

Universidad Carlos III de Madrid

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



Grado en Ingeniería en Tecnologías

Industriales

Proyecto Fin de Grado

**EJE FERROVIARIO “WHEELSET”:  
METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR  
DE INTENSIDAD DE TENSIONES USANDO  
ABAQUS II**

Autor: Juan Carlos Vázquez Olmo

Tutor: Juan Carlos García Prada

Septiembre 2015





---

Título: Eje ferroviario “wheelset”: Metodología para el cálculo del Factor de Intensidad de Tensiones usando *ABAQUS II*

Autor: Juan Carlos Vázquez Olmo

Tutor: Juan Carlos García Prada

Coordinador: Zoser Kalengayi Tshilumbu

### **EL TRIBUNAL**

Presidente:

Vocal:

Secretario:

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo de Fin de Grado el día 16 de Octubre de 2015 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de:

### **VOCAL**

**SECRETARIO**

**PRESIDENTE**



## RESUMEN

Este trabajo de fin de grado se lleva a cabo con el objetivo de realizar un análisis en un eje ferroviario. El eje está instalado en un bogie, cuya definición según la RAE es: "Conjunto de dos pares de ruedas montadas sobre sendos ejes próximos, paralelos y solidarios entre sí, que se utilizan en ambos extremos de los vehículos de gran longitud destinados a circular sobre carriles". Este tren pertenece a RENFE, y se denomina CIVIA. El mismo ha sido concebido, proyectado y diseñado para el transporte de viajeros en recorridos de cercanías.

La finalidad principal del estudio persigue el cálculo de las tensiones a las que se ve sometido el eje en condiciones normales de funcionamiento, es decir, soportando 25 toneladas repartidas entre sus extremos en voladizo. Las consecuencias que pueden provocar dicha aplicación son entre otras, la aparición de una grieta en el eje.

El necesario cálculo del Factor de Intensidad de Tensiones (FIT) ante la presencia de una fisura o grieta en el eje, ha sido llevado a cabo utilizando el Método de los Elementos Finitos (MEF). Dicha necesidad, junto con el cálculo de las tensiones referidas, se convierten en el determinante principal que da origen al presente estudio.

El desarrollo del proyecto se lleva a cabo utilizando el Método de Elementos Finitos Extendidos (XFEM) sirviéndose para ello del uso del programa *ABAQUS*, que permite el estudio del análisis estático, así como, calcular el FIT de una manera eficaz.

**Palabras clave:** Eje ferroviario, Factor de Intensidad de Tensiones, Método de Elementos Finitos, *ABAQUS*, Fractura.





## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	17
OBJETIVOS .....	20
ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....	22
<b>1. Teoría de Griffith de la fractura frágil</b> .....	23
<b>2. Fallos en los Buques Liberty</b> .....	25
<b>3. Accidentes más actuales</b> .....	26
CAPÍTULO I. MECÁNICA DE LA FRACTURA .....	31
<b>1.1. Introducción a la Mecánica de Fractura</b> .....	32
<b>1.2. Principios de la fractura</b> .....	32
<b>1.3. Tipos de fractura</b> .....	34
<b>1.4. Tipos de fallos</b> .....	36
<b>1.5. Mecánica de fractura elástico lineal (MFEL)</b> .....	37
1.5.1. Factores de intensidad de tensiones.....	38
1.5.2. Tensiones y desplazamientos en el frente de fisura .....	38
1.5.3. Deformación en el frente de fisura .....	40
1.5.4. Tenacidad de fractura.....	41
CAPÍTULO II. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS O MEF .....	43
<b>2.1. Introducción al método</b> .....	44
<b>2.2. Ideas básicas sobre el MEF</b> .....	44
<b>2.3. Elementos básicos del MEF</b> .....	45
2.3.1. Elemento .....	45
2.3.2. Nodo.....	47
CAPÍTULO III. ABAQUS 6.10.....	49
<b>3.1. Introducción</b> .....	50
<b>3.2. Interfaz gráfica de ABAQUS</b> .....	51
<b>3.3. ABAQUS/CAE</b> .....	54
CAPÍTULO IV. DISEÑO DEL PROBLEMA EN ABAQUS .....	58
<b>4.1. Diseño de las piezas o “parts”</b> .....	59
<b>4.2. Definición de las propiedades del material</b> .....	61
4.2.1. Crear material.....	61
4.2.2. Crear sección .....	62



---

4.2.3.	Asignar sección .....	63
4.3.	<b>Ensamblar el modelo</b> .....	63
4.3.1.	Colocar el eje .....	63
4.3.2.	Realizar cortes .....	64
4.3.3.	Colocar grieta .....	65
4.4.	<b>Definir grieta</b> .....	66
4.5.	<b>Definir el paso</b> .....	67
4.6.	<b>Definir los parámetros de salida</b> .....	69
4.7.	<b>Definir cargas</b> .....	72
4.8.	<b>Definir restricciones</b> .....	75
4.9.	<b>Definir mallado</b> .....	76
4.10.	<b>Definir trabajo (job)</b> .....	77
CAPÍTULO V. RESULTADOS .....		80
5.1.	<b>Estudio de convergencia</b> .....	81
5.2.	<b>Estudio de las tensiones en el eje fracturado</b> .....	82
5.3.	<b>Cálculo del FIT en el eje fracturado</b> .....	86
CONCLUSIONES .....		109
FUTUROS TRABAJOS .....		111
PRESUPUESTO GENERAL .....		113
BIBLIOGRAFÍA .....		117
PLANO DEL EJE FERROVIARIO .....		120
1.	<b>Ampliación del plano del eje ferroviario</b> .....	121



## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Tensión de Von Mises (MPa) en función del número de elementos

Gráfica 2. Tensión de Von Mises (MPa) en función del número de nodos

Gráfica 3. Tensión de VM frente a profundidad en la posición angular de 0 grados

Gráfica 4. Tensión de VM frente a profundidad en la posición angular de 30 grados

Gráfica 5. Tensión de VM frente a profundidad en la posición angular de 60 grados

Gráfica 6. Tensión de VM frente a profundidad en la posición angular de 90 grados

Gráfica 7. Tensión de VM frente a profundidad en la posición angular de 120 grados

Gráfica 8. Tensión de VM frente a profundidad en la posición angular de 150 grados

Gráfica 9. Tensión de VM frente a profundidad en la posición angular de 180 grados

Gráfica 10. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 0 grados

Gráfica 11. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 0 grados

Gráfica 12. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 0 grados

Gráfica 13. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 0 grados

Gráfica 14. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 0 grados

Gráfica 15. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 0 grados

Gráfica 16. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 0 grados

Gráfica 17. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 0 grados

Gráfica 18. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 0 grados

Gráfica 19. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 30 grados

Gráfica 20. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 30 grados





Gráfica 21. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 30 grados

Gráfica 22. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 30 grados

Gráfica 23. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 30 grados

Gráfica 24. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 30 grados

Gráfica 25. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 30 grados

Gráfica 26. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 30 grados

Gráfica 27. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 30 grados

Gráfica 28. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 60 grados

Gráfica 29. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 60 grados

Gráfica 30. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 60 grados

Gráfica 31. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 60 grados

Gráfica 32. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 60 grados

Gráfica 33. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 60 grados

Gráfica 34. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 60 grados

Gráfica 35. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 60 grados

Gráfica 36. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 60 grados

Gráfica 37. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 90 grados



Gráfica 38. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 90 grados

Gráfica 39. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 90 grados

Gráfica 40. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 90 grados

Gráfica 41. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 90 grados

Gráfica 42. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 90 grados

Gráfica 43. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 90 grados

Gráfica 44. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 90 grados

Gráfica 45. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 90 grados

Gráfica 46. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 120 grados

Gráfica 47. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 120 grados

Gráfica 48. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 120 grados

Gráfica 49. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 120 grados

Gráfica 50. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 120 grados

Gráfica 51. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 120 grados

Gráfica 52. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 120 grados

Gráfica 53. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 120 grados

Gráfica 54. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 120 grados



Gráfica 55. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 150 grados

Gráfica 56. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 150 grados

Gráfica 57. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 150 grados

Gráfica 58. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 150 grados

Gráfica 59. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 150 grados

Gráfica 60. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 150 grados

Gráfica 61. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 150 grados

Gráfica 62. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 150 grados

Gráfica 63. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 150 grados

Gráfica 64. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 180 grados

Gráfica 65. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 180 grados

Gráfica 66. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 180 grados

Gráfica 67. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 180 grados

Gráfica 68. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 180 grados

Gráfica 69. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 180 grados

Gráfica 70. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 180 grados

Gráfica 71. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 180 grados



Gráfica 72. Valores del FIT frente a la coordenada del frente de la grieta en la posición de 180 grados



## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Esquema de la propagación de una grieta elíptica
- Figura 2. Tensión en las zonas próximas a las puntas de la grieta
- Figura 3. Rotura del petrolero *Schenectady*
- Figura 4. Rotura del MV *Kurdistan*
- Figura 5. Fractura del ala de una jet de pasajeros
- Figura 6. Fractura en el tren de aterrizaje de un avión
- Figura 7a. Cohete sólido derecho recuperado del transbordador *Challenger*
- Figura 7b. Hielo en la torre de lanzamiento antes del despegue del *Challenger*
- Figura 8. Accidente Viareggio
- Figura 9a. Modo de Fractura I
- Figura 9b. Modo de Fractura II
- Figura 9c. Modo de Fractura III
- Figura 10. Curva tensión-deformación en materiales dúctiles y frágiles
- Figura 11 a. Proceso del mecanismo de fractura dúctil
- Figura 11b. Esquema de una fractura dúctil (a), fractura moderadamente dúctil (b) y fractura frágil sin deformación plástica (c)
- Figura 12. Ecuaciones de tensión y desplazamientos en el frente de una fisura
- Figura 13. Sistema de coordenadas y tensor de tensiones en el extremo de una fisura
- Figura 14. Distribución de la componente de la tensión  $\sigma_y$  en la región del frente de fisura
- Figura 15a. Simulación del impacto de un vehículo con MEF
- Figura 15b. Elementos permisibles en XFEM. a) Tetraedro de primer orden, b) Tetraedro de segundo orden, c) Hexaedro de primer orden
- Figura 16. Elemento sólido
- Figura 17. Elemento tipo placa
- Figura 18. Elemento tipo viga
- Figura 19. Pantalla inicial de *ABAQUS* 6.10
- Figura 20. Interfaz gráfica de *ABAQUS* 1
- Figura 21. Interfaz gráfica de *ABAQUS* 2



- Figura 22. Interfaz gráfica de *ABAQUS* 3
- Figura 23. Interfaz gráfica de *ABAQUS* 4
- Figura 24. Interfaz gráfica de *ABAQUS* 5
- Figura 25. Interfaz gráfica de *ABAQUS* 6
- Figura 26. Interfaz gráfica de *ABAQUS* 7
- Figura 27. Plano del eje real
- Figura 28a. Características del eje ferroviario
- Figura 28b. Perfil de revolución del eje ferroviario
- Figura 29a. Características de la grieta
- Figura 29b. Diseño de la grieta
- Figura 30a. Pasos para definir material I
- Figura 30b. Pasos para definir material II
- Figura 31. Crear sección I
- Figura 32. Crear sección II
- Figura 33. Asignar material al eje ferroviario
- Figura 34. Creación de instancia
- Figura 35. Creación del plano de corte
- Figura 36. Crear partición
- Figura 37a. Eje ferroviario con las particiones creadas
- Figura 37b. Eje ferroviario con la grieta situada
- Figura 38a. Creación de la grieta
- Figura 38b. Definición de la grieta
- Figura 39. Creación del paso
- Figura 40. Definición del paso
- Figura 41. Paso 1 para la mejora de la convergencia
- Figura 42. Paso 2 para la mejora de la convergencia
- Figura 43. Definición de los parámetros de salida del eje 1
- Figura 44. Definición de los parámetros de salida del eje 2
- Figura 45. Definición de los parámetros de salida de la grieta



- Figura 46. Superficie de aplicación de la presión
- Figura 47. Eje ferroviario con plano de corte
- Figura 48. Definición de la presión
- Figura 49. Eje ferroviario con la presión aplicada
- Figura 50. Eje ferroviario con la superficie restringida remarcada
- Figura 51. Eje ferroviario con las cargas y las restricciones colocadas
- Figura 52. Definición de las características de la malla
- Figura 53. Definición del tamaño aproximado del elemento
- Figura 54. Eje ferroviario mallado
- Figura 55. Iniciación del estudio
- Figura 56. Tabla de las tensiones de Von Mises en función de la malla
- Figura 57. Esquema del eje con la posición de la grieta
- Figura 58. Tabla con los valores de la tensión de VM en función del ángulo y de la profundidad de la grieta
- Figura 59. Tabla de costes de personal
- Figura 60. Tabla de costes de amortización
- Figura 61. Tabla de resumen de costes
- Figura 62. Plano del eje ferroviario
- Figura 63. Sección “W” del plano del eje ferroviario
- Figura 64. Sección “U” del plano del eje ferroviario
- Figura 65. Sección “V” del plano del eje ferroviario
- Figura 66. Sección “X” del plano del eje ferroviario
- Figura 67. Sección “Y” del plano del eje ferroviario







## INTRODUCCIÓN

Desde que el hombre se inició en la práctica del diseño ingenieril, ha tenido gran cantidad de problemas con el uso de los materiales, debido a la aparición ocasional de grietas o defectos en ellos, como causa de las condiciones tan exigentes a las que los mismos se ven sometidos.

La aparición de estas grietas o defectos puede afectar de forma determinante en el rendimiento futuro de los mecanismos; suponiendo sin duda grandes costes económicos como consecuencia de los daños sufridos en los materiales, sin olvidarnos de los posibles efectos personales negativos que también se pueden llegar a provocar. En los últimos años se han llevado a cabo diversos estudios económicos en diferentes países, que han estimado que el coste anual en los casos de fractura de componentes mecánicos supera el 4% del Producto Interior Bruto del País. En el caso de España, dicho coste anual rondaría los 2.500 millones de euros. Sirva de referencia que el coste económico provocado por los accidentes de tráfico en nuestro país ronda el 2% del PIB.

Debido a la pérdida de estas cantidades de dinero, muchos países llevan a cabo estudios cuyo objetivo es prever la aparición de dichas grietas y localizar los puntos en los que suelen aparecer. De esta manera, se podría cambiar la pieza por una en perfecto estado que no tuviera el mismo riesgo de sufrir rotura, y disminuir así los costes provocados por las apariciones repentinas de dichas grietas.

En nuestro caso, vamos a estudiar el comportamiento de un eje de rotación, el cual se ve alterado por la aparición de una grieta. Los defectos en estas piezas suelen aparecer por la combinación de la flexión de los ejes, debido a la aplicación de fuerzas verticales y a la torsión de los mismos por el giro. Esta combinación provoca en el eje una fatiga tensional que será la culpable de la rotura en la mayoría de estas piezas. La aplicación continuada de estas cargas variables en el tiempo, puede conllevar la aparición de defectos en el material, normalmente en su superficie, que se propagan a lo largo del eje llegando en ocasiones a provocar su fractura.

El crecimiento inestable de dichas grietas o fisuras se alcanza cuando se dan las condiciones críticas de tensión nominal. Esta evolución de la grieta se va a observar por medio de un parámetro denominado Factor de Intensidad de Tensiones (FIT).

Dependiendo de la extensión de la deformación plástica que precede a la fractura, se pueden encuadrar estas fracturas en tres categorías distintas, como son:

- Fractura lineal elástica: cuando la dimensión de la zona plástica está confinada a una región de pequeño tamaño que se sitúa frente a la punta de la grieta, y la deformación del resto del cuerpo es de tipo elástica.
- Fractura elasto-plástica: la zona plástica se extiende en el ancho de la pieza, pero siendo como una región estrecha alrededor del plano de la grieta.
- Colapso Plástico: antes de la fractura se produce una deformación plástica generalizada.

Para el desarrollo de este trabajo, nos hemos centrado en la fractura lineal elástica, debido a que la mayoría de los elementos estructurales son diseñados y puestos a prueba para su posterior uso, dentro de los límites elásticos del material del que está compuesto.



En este proyecto se va a calcular el Factor de Intensidad de Tensiones mediante el método de elementos finitos, por medio del programa *ABAQUS*. Se va a estudiar el FIT en diferentes condiciones, variando la posición de la grieta a lo largo del giro del eje y la profundidad de ésta.





## OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es:

El inicio de un proyecto que el Departamento de Ingeniería Mecánica y Organización Industrial del Campus de Leganés de la Universidad Carlos III de Madrid quiere llevar a cabo, basado en el estudio del **comportamiento de ejes ferroviarios “Wheelset”** en funcionamiento y la influencia en los mismos de la **posible aparición de grietas**. Con los datos de este estudio, posteriormente, en estudios futuros, se pretenderá determinar los tiempos de trabajo máximos que puede realizar un tren, en el que en alguno de sus ejes haya aparecido una grieta, antes de ser llevado a mantenimiento, con la idea de optimizar estos, teniendo en cuenta los factores de seguridad admisibles.

La consecución de este objetivo, serviría de base para la formalización y creación futura de un marco técnico legal que desarrollase esta materia.

Para conseguir este objetivo ha sido preciso llevar a cabo actividades como las siguientes:

- Creación de una metodología eficaz para el cálculo del Factor de Intensidad de Tensiones en un eje fracturado.
- Estudio y mejora del manejo del programa *ABAQUS*.
- Fabricación de manual de modelización de grietas con el método XFEM en *ABAQUS*.
- Modelización de un eje por medio de *ABAQUS* que permite representar el comportamiento de un eje real fracturado.
- Aprendizaje y mejora de conceptos relacionados con la fractura mecánica.
- Introducción al mundo ferroviario.





## ANTECEDENTES HISTÓRICOS

La aplicación de los materiales en el diseño ingenieril es algo que ha causado gran variedad de problemas desde el principio de los tiempos.

Durante la Edad de Piedra, la mayor dificultad era el conformado de los materiales. Más adelante, en la Edad de Bronce y la Edad de Hierro, las principales dificultades se encontraban, también en este caso, en el conformado de los metales, que suponía una tarea de gran labor y costes. El principal objetivo de esta tarea era la producción de armas, herramientas y ornamentos de carácter bélico. Con el paso del tiempo y al aumentar el conocimiento que concierne al procesado de los materiales, aumentó también la utilización de los metales en diferentes infraestructuras. Sin embargo, su uso en algunas estructuras trajo consigo una serie de imprevistos en el comportamiento que desencadenaron fallos inesperados. Uno de los principales fines de los metales era la soldadura de piezas de madera.

Hay que remontarse a la época en la que Julio César reforzaba sus fortificaciones para evitar que se produjeran roturas en ellas, o en la que se construyeron las perpetuas pirámides en Egipto, para afirmar que el diseño de estructuras que evitaran ciertas fracturas y perecieran así en el tiempo, no es una idea nueva de este siglo. De hecho, no son pocos los puentes y edificaciones que se mantienen en pie actualmente a pesar de haber sido construidos miles de años atrás.

La fragilidad de los materiales se ha manifestado desde la antigüedad, y los problemas que ésta ha originado en la sociedad son visibles, por ejemplo, a través de la pérdida de elasticidad debido al frío en las obras ingenieriles llevadas a cabo durante el siglo XIX. Por otro lado, uno de los principales problemas del uso de los ladrillos y el mortero es que son tan frágiles que no soportan cargas de tracción. Es por esta causa que, antes de la llegada de la Revolución Industrial, las estructuras, fabricadas en su mayoría con estos dos materiales, tenían como principal objetivo el de soportar el esfuerzo de compresión, como es el caso de los arcos. A su vez, la incorporación de materiales metálicos permitió cambiar estos dos por acero, permitiendo trabajar de este modo a tracción. Sin embargo, esto también generó problemas, ya que se produjeron fallos debidos a las tensiones. La principal causa de dichos fallos era una incógnita, hasta el punto de que en la primera edición del *Tratado de elasticidad de Love*, de 1944, se explica que los ingenieros de aquella época aplicaban coeficientes de seguridad superiores a 10 para tratar de evitarlos.

La Industria Naval también ha sufrido multitud de accidentes a lo largo de la historia debido a la fragilidad de los materiales, sobre todo durante los años 40 y 50, por lo que es de gran interés en el desarrollo de la Mecánica de Fractura.

## 1. Teoría de Griffith de la fractura frágil

En 1920, el ingeniero inglés Alan Arnold Griffith, fue el primero en intentar analizar matemáticamente el fenómeno de fractura. Griffith sentó las bases de la Mecánica de Fractura, al deducir que la fractura es el resultado de un proceso de conversión de energía, que depende del esfuerzo y del tamaño de dicha grieta. Definió el fenómeno de fractura como la separación o fragmentación de un cuerpo en un mínimo de dos partes, debido a la acción de esfuerzos, creándose de este modo las superficies de fractura. El ingeniero afirmó que, durante el proceso de propagación de la grieta, se produce la liberación de energía de deformación elástica, la energía potencial que se almacena en el material. Al extenderse la grieta, se forman nuevas superficies en sus caras que hacen que la energía superficial aumente también.

Del mismo modo, Griffith desarrolló un criterio para la propagación de una grieta, afirmando que dicha grieta se propaga si el decremento de la energía de deformación elástica es, al menos, igual a la energía necesaria para crear la nueva superficie de la grieta. A continuación se muestra un esquema que representa la geometría de grietas superficiales e internas, en concreto, la propagación de una grieta elíptica.

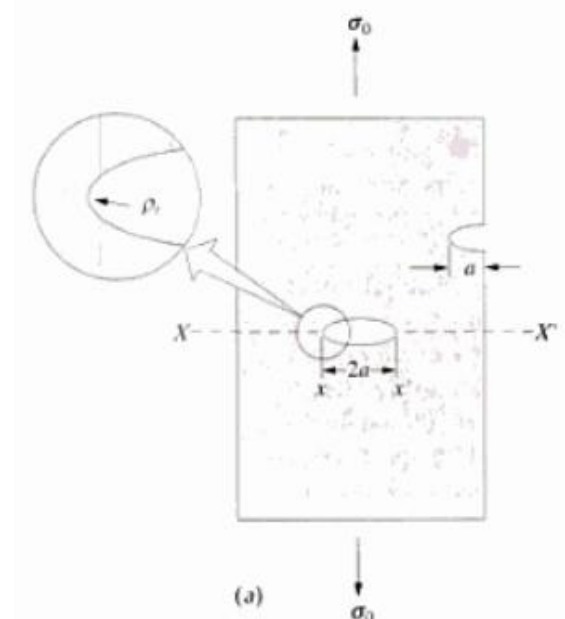


Figura 1. Esquema de la propagación de una grieta elíptica

La siguiente figura muestra la tensión en las zonas próximas a las puntas de la grieta:

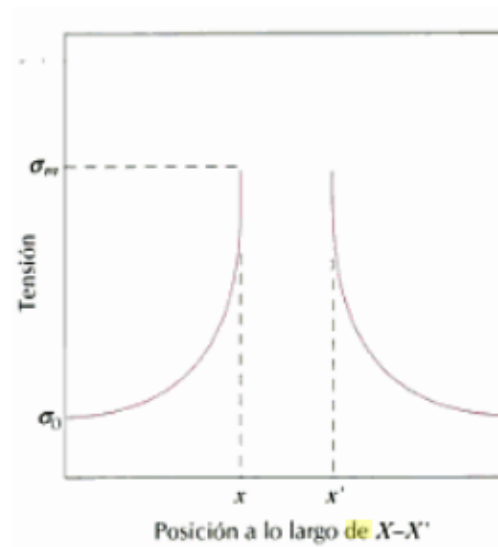


Figura 2. Tensión en las zonas próximas a las puntas de la grieta

Cuando la grieta tiene forma elíptica, su eje mayor es perpendicular a la tensión aplicada, por lo que su tensión máxima en el extremo de la grieta ( $\sigma_m$ ) se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$\sigma_m = 2\sigma_o (a/p_t)^{1/2}$$

En ella,  $\sigma_o$  es la tensión nominal aplicada;  $a$  es la longitud de la grieta superficial o la mitad de la longitud de una grieta interna; y  $p_t$  el radio de la curvatura de la punta de la grieta.

A veces, al cociente  $\sigma_m/\sigma_o$  se le llama también Factor de concentración de tensiones  $k_t$ , el cual mide el grado con el que una tensión externa es amplificada en el extremo de una pequeña grieta, es decir, describe el efecto geométrico de la grieta en el esfuerzo local o punta de la grieta, y se puede calcular de la siguiente forma:

$$k_t = \sigma_m/\sigma_o = 2 (a/p_t)^{1/2}$$

Según Griffith, la Mecánica de Fractura trata de relacionar la forma de una grieta y su tamaño, con las fuerzas y las cargas que llevan a la fractura de un componente de una forma determinada. Para ello, lleva a cabo el cálculo de la distribución de los esfuerzos, los desplazamientos y deformaciones que se producen alrededor de una grieta, y los balances de energía que tienen lugar durante la propagación de dicha grieta.



---

## 2. Fallos en los Buques Liberty

Los fallos en la construcción de los buques en la Segunda Guerra Mundial pusieron de manifiesto los graves problemas de la fractura frágil, poniendo así a prueba el mundo de la Ingeniería. Los Buques Liberty fueron construidos mediante la técnica de cascos totalmente soldados, proceso dirigido por Henry Kaiser. Esta técnica tenía la gran ventaja de producir buques rápidamente, algo que realmente necesitaban los astilleros navales americanos, los cuales habían empleado hasta el momento la construcción roblonada.

Entonces se construyeron unos 3.000 buques Liberty y 500 petroleros T2. Pues bien, 1.298 de los buques construidos durante la Segunda Guerra Mundial tuvieron roturas graves y 233 roturas frágiles graves, 12 de estos últimos se dividieron literalmente en dos partes. Se realizaron diversos cambios que redujeron notablemente los fallos, la mayoría de los cuales se debían a las soldaduras y a la calidad del acero. Algunos de esos buques se fracturaron en los muelles debido a la acción del frío, como se ha nombrado en líneas anteriores. De hecho, de todos los accidentes producidos entre octubre de 1941 y Mayo de 1942, 38 fueron durante los meses de Diciembre y Enero, los más fríos del año, mientras que durante el resto de meses tan sólo se produjeron unos 20. La siguiente figura muestra la rotura del petrolero Schenectady, producida una noche de invierno.

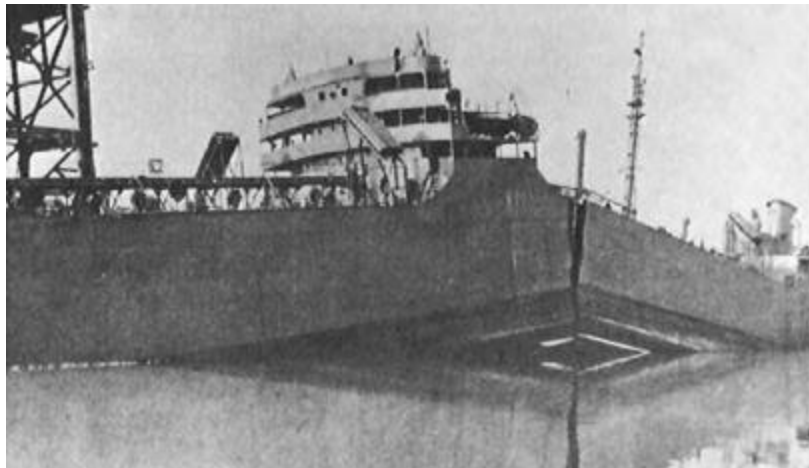


Figura 3. Rotura del petrolero Schenectady

La siguiente imagen muestra la sección de rotura del MV Kurdistan, que se fracturó en 1979.



Figura 4. Rotura del MV Kurdistan

El acero había resultado muy útil en la técnica de construcción roblonada, pero no tanto para la soldadura. En 1947, el American Bureau of Shipping (ABS), sociedad naval de clasificación, restringió la composición química de los aceros. En 1949, la sociedad de clasificación inglesa, llamada Lloyds Register (LR), aprobó el uso de esos aceros en la producción de buques soldados de manera total o parcial.

Gracias a todos esos cambios, los fallos nombrados se han reducido hasta llegar a ser casi inexistentes en la época actual.

### **3. Accidentes más actuales**

En la actualidad, los principales accidentes se producen en plataformas petrolíferas, recipientes a presión, puentes, turbogeneradores y en el fuselaje de aviones, como muestra la siguiente imagen del ala de un jet de pasajeros.



Figura 5. Fractura del ala de una jet de pasajeros

En los años 50, dos aviones Comet De Havilland se estrellaron debido a los fallos producidos por las grietas de fatiga localizadas cerca de las ventanas de fuselaje. Varios de los fallos en la Industria Aeronáutica se atribuyen a los trenes de aterrizaje, como se puede observar en la imagen de 2011 que se dispone después de estas líneas; en los motores, a la fatiga y la corrosión bajo tensión; y en los F-11, a grietas ya existentes.



Figura 6. Fractura en el tren de aterrizaje de un avión

Varios de los fallos de la Industria Aeronáutica se atribuyen a los trenes de aterrizaje; en los motores, a la fatiga y la corrosión bajo tensión; y en los F-11, a grietas ya existentes. También llaman la atención los fallos en el perno del motor de los DC-10, que ocasionaron accidentes catastróficos. Otro de los accidentes más importantes es el del transbordador Challenger en 1986.



Figura 7a. Cohete sólido derecho recuperado del transbordador Challenger

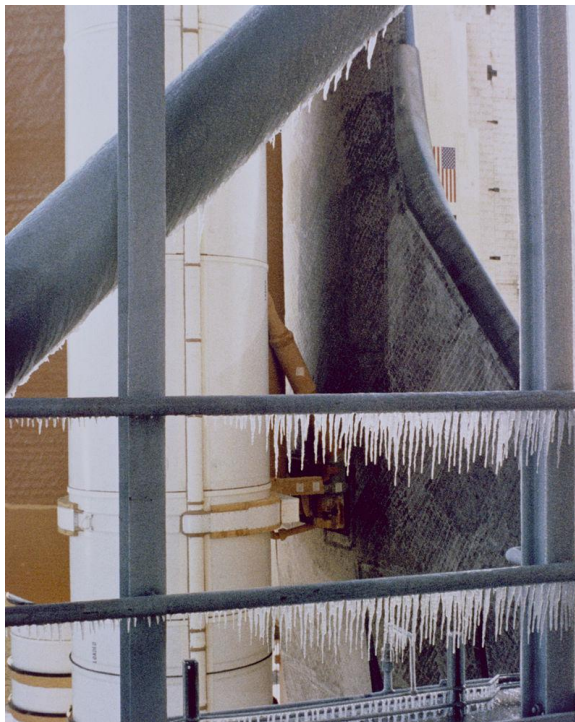


Figura 7b. Hielo en la torre de lanzamiento antes del despegue del *Challenger*

También han ocurrido accidentes dentro del mundo ferroviario debidos a la fractura de componentes. Se puede destacar el ocurrido en Junio de 2009 en Viareggio, Italia, producido por la fractura de uno de los ejes de un vagón. En dicho accidente fallecieron más de 20 personas.



Figura 8. Accidente Viareggio

Actualmente, las industrias más afectadas son la Industria Naval y Aeronáutica, como ya se ha visto, la Ingeniería Química y Petroquímica, la Ingeniería Energética y la Ingeniería de Transporte y Distribución de gases. También son de especial importancia las obras de Ingeniería Civil, donde se desarrollan importantes tareas de análisis y diseño.







# **CAPÍTULO I**

## **MECÁNICA DE LA FRACTURA**

- 1.1. Introducción a la Mecánica de Fractura
- 1.2. Principios de la fractura
- 1.3. Tipos de fractura
- 1.4. Tipos de fallos
- 1.5. Mecánica de la Fractura Elástico Lineal (MFEL)



### 1.1. Introducción a la Mecánica de Fractura

La Mecánica de Fractura es una rama de la mecánica de sólidos deformables, que se encarga de estudiar la estabilidad en la estructura de los materiales, así como la posible formación de grietas o defectos y la concentración de tensiones que ellos producen en dicho material. El uso de otras ramas de la mecánica para estudiar estos fenómenos, hace posible la mejora del diseño de productos, así como el control de su propagación con el fin de evitar el fallo de sus componentes, además, sin la necesidad de usar coeficientes de seguridad injustificados. La Mecánica de Fractura pone en práctica las teorías de elasticidad y plasticidad a los defectos cristalográficos microscópicos de los materiales, con el fin de predecir la fractura mecánica en los cuerpos. La fractografía es altamente utilizada en la Mecánica de Fractura para entender las causas de falla y verifica las predicciones teóricas identificando las fallas reales.

Los conocimientos que aporta el estudio de la Mecánica de Fractura, son necesarios para predecir los siguientes problemas de la Ingeniería:

1. El tamaño y la forma de las partes estructurales.
2. La localización, prevención y estudio de las posibles fracturas en materiales.
3. Las cargas aplicadas en los materiales utilizados.
4. Las tensiones residuales que se producen en los cuerpos.

La Mecánica de Fractura considera que el proceso de fractura se inicia con una grieta, la cual se propaga hasta que la pieza se rompe y se separa completamente. Existen dos tipos de propagación de la grieta:

- Si la propagación de la grieta se puede detener en caso de disminuir o hacer desaparecer los esfuerzos, la propagación es **estable**.
- Si por el contrario, es casi imposible detener el proceso de propagación porque la grieta se propaga rápidamente, entonces la propagación es **inestable**.

Debido a que la gran mayoría de los componentes que forman la estructura y la mecánica, son diseñados dentro de los límites elásticos del material, la aproximación más común es la de la **Mecánica de fractura elástica lineal** (MFEL).

La Mecánica de Fractura, es una ciencia relativamente nueva si se compara con otras ciencias relacionadas con la Ingeniería y la mecánica. Sin embargo, es muy demandada por gran cantidad de ingenieros con el fin de reducir o incluso, eliminar por completo los fallos por rotura, que suelen ser los más comunes y llamativos en general.

### 1.2. Principios de la fractura

La mecánica de la fractura se encarga de estudiar el comportamiento de cuerpos sólidos que tienen grietas y defectos. Dicha materia surgió a principios del siglo XX, debido a que las ecuaciones conocidas en aquella época, concretamente las de la Teoría de la



Elasticidad, no eran suficientes para explicar el comportamiento que provocaban estas alteraciones en dichos sólidos.

La aparición de grietas o defectos en los sólidos, puede ser consecuencia de múltiples factores; sin embargo, cabe destacar por encima de todos, los diseños defectuosos en los modelos y la mala selección de los materiales.

Al producirse una grieta, ésta se desplaza, en función del plano de fractura, de tres modos distintos:

- Modo I: abertura de la grieta en dirección perpendicular al plano de la grieta.

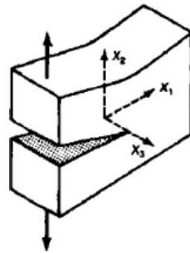


Figura 9a. Modo de Fractura I

- Modo II: desplazamiento de las superficies en sentidos opuestos, en la misma dirección de avance de la grieta.

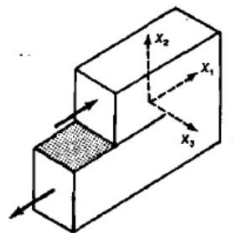


Figura 9b. Modo de Fractura II

- Modo III: desplazamiento fuera del plano y en dirección perpendicular al avance de la grieta.

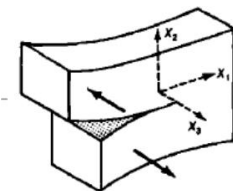


Figura 9c. Modo de Fractura III

Estudiar la aparición de fallos en servicio es muy importante, debido a que su conocimiento permite conocer los límites de estos materiales y saber para qué tipo de trabajo es adecuado su uso.

### 1.3. Tipos de fractura

En la Ingeniería, se conocen dos tipos de fractura: la **fractura frágil** y la **fractura dúctil**. La principal diferencia entre estas dos, es la posibilidad o no de los materiales a deformarse permanentemente cuando ha desaparecido la aplicación de la carga, lo que se conoce como deformación plástica.

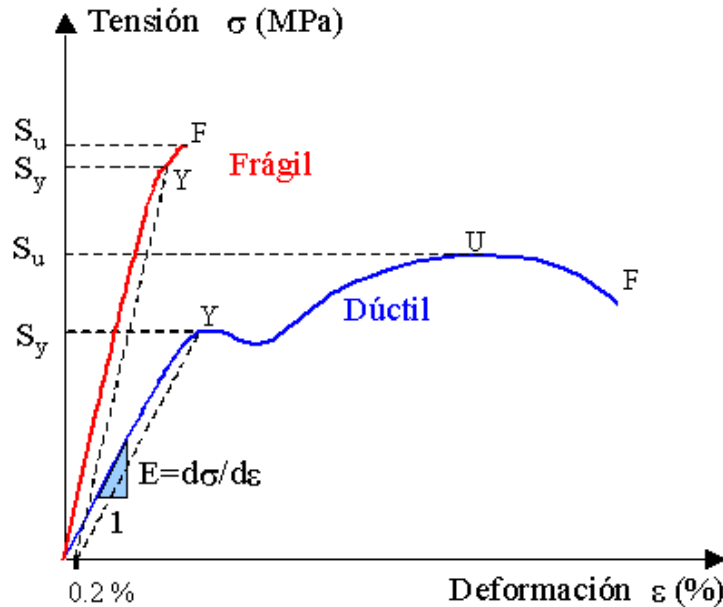


Figura 10. Curva tensión-deformación en materiales dúctiles y frágiles

#### ➤ Fractura frágil

En general, se puede decir que un material es frágil cuando no puede apreciar una deformación sin que se produzca la rotura. Normalmente sucede en materiales estructurales de manera repentina y sin avisar, es decir, sin llegar a deformarse plásticamente, llegando a ocurrir a velocidades muy altas, de hasta los 2000 m/s en los aceros.

La fractura frágil aparece en los planos cristalográficos específicos, que dependen de la estructura, perpendiculares a la dirección de la aplicación de la carga, los cuales son conocidos como planos de fractura. Además, suelen aparecer cuando las temperaturas son bajas.

Este tipo de fractura no es el más común, pero son tan importantes porque, debido a su rapidez, cuando suceden suelen ser catastróficas y provocan daños muy importantes.

#### ➤ Fractura dúctil

Una fractura dúctil se relaciona con un alto nivel de deformación plástica. La grieta suele manifestarse antes de que se complete la fractura al cien por cien, ya que su velocidad de propagación es lenta.

En la siguiente figura, se muestra el proceso del mecanismo de fractura, el cual se explicará más adelante:

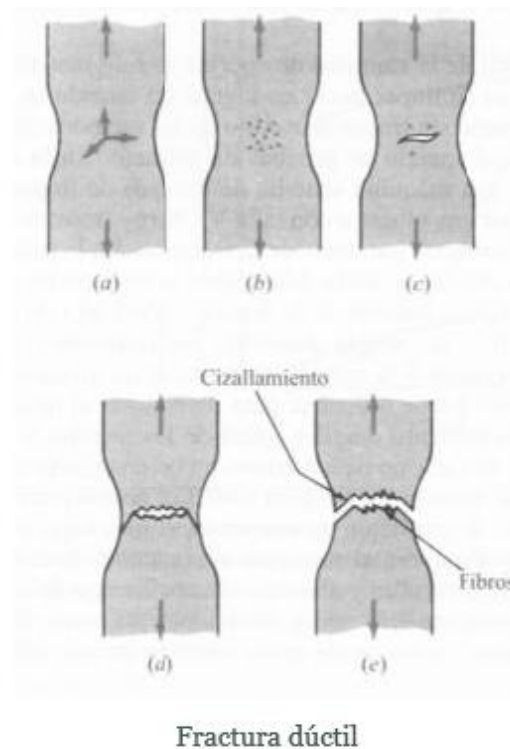


Figura 11a. Proceso del mecanismo de fractura dúctil

El mecanismo de rotura comienza con la aparición de la estricción (a) (reducción de la sección en la zona de la rotura), seguida de la formación de micro cavidades en el interior (b). A continuación, surge la grieta principal, que tiene forma elíptica, con su eje mayor orientado en la dirección perpendicular a la de la aplicación de la fuerza (c). La siguiente etapa, que consiste en la propagación de la grieta (d), es la más rápida del proceso de fractura. Para finalizar, se produce la fractura final del material (e), conocida como fractura de copa-cono.

Los esquemas de la siguiente imagen muestran de izquierda a derecha, un ejemplo de cada tipo de fractura: fractura dúctil (a), fractura moderadamente dúctil (b) y fractura frágil sin deformación plástica (c):

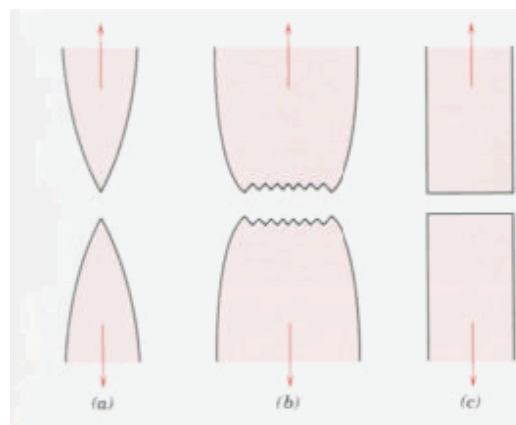


Figura 11b. Esquema de una fractura dúctil (a), fractura moderadamente dúctil (b) y fractura frágil sin deformación plástica (c)

#### 1.4. Tipos de fallos

Existe una gran variedad de fallos. A continuación, se lleva a cabo una selección de ellos, en función de dos variables:

➤ Según la aplicación de la carga.

En función del modo de aplicación de la carga, los fallos pueden ser estáticos o dinámicos.

- Si la carga es **dinámica**, y se repita de forma cíclica, la rotura será de tipo dinámico. Además, tendrá unas características que se podrán medir, como puede ser el número de ciclos que se sucederán hasta que se provoque la fractura.
- Si la carga es **estática**, sucederá una fractura poco violenta, denominada rotura estática. Las cargas estáticas se pueden aplicar en compresión o tracción, en torsión, o en cizalla.

➤ Según la magnitud.

Además de la aplicación de la carga, existe otra variable que permite clasificar las roturas en función del tipo de fractura: la magnitud. A su vez, ésta establece tres niveles de fracturación:

- **Nivel atómico:** en este primer nivel, las deformaciones de los materiales se estudian según la *Teoría de las dislocaciones*. Es importante saber situar en el espacio los planos de deslizamiento, y poder así conocer su influencia en la evolución de la deformación. A pesar de todo, en la práctica no tienen prácticamente influencia en cuanto al estudio de los fallos.
- **Nivel microscópico:** en este nivel disponemos de una segunda clasificación de las fracturas:
  - **Fracturas transcrystalinas**, dentro de las cuales se pueden apreciar diferentes grupos, que se clasifican en función del mecanismo de rotura del material y de la apariencia morfológica de la zona de rotura.
  - **Fracturas intercrystalinas**, que constan de la desunión de los granos por medio de sus bordes y de la pequeña deformación que sufren dichos granos en sus superficies.
- **Nivel macroscópico.** A nivel macroscópico, la clasificación de las fracturas es más voluminosa que en las anteriores, estableciéndose así cuatro grupos diferentes:
  - Fractura frágil producida por carga estática: surge por la aparición de grietas en planos perpendiculares a la dirección de aplicación de la carga, sin apenas deformación plástica.

- Fractura frágil producida por carga estática permanente: cuyas causas pueden ser las siguientes:
  - a) Fragilización por hidrógeno.
  - b) Fragilización por metal líquido.
  - c) Fragilización por irradiación neutrónica.
  - d) Corrosión-tensión.
- Fractura dúctil producida por carga estática: esta fractura se caracteriza por una gran absorción de energía y una baja velocidad de propagación, lo que provoca un alto nivel de deformación plástica. A su vez, se divide en tres subgrupos, dependiendo del tipo de carga:
  - a) Tracción.
  - b) Flexión.
  - c) Torsión.
- Fractura producida por fatiga: estas últimas se clasifican según el efecto mecánico en:
  - a) Bajo número de ciclos.
  - b) Alto número de ciclos.

Si además del efecto mecánico, se tiene en cuenta el efecto de la temperatura y de la corrosión, la clasificación llevada a cabo, sería:

- a) Fatiga-temperatura.
- b) Fatiga-corrosión.

### **1.5. Mecánica de fractura elástico lineal (MFEL)**

El principal objetivo de la *Teoría de la elasticidad* es desarrollar ecuaciones que sean capaces de predecir el fallo de los cuerpos sólidos que no sufren imperfecciones. Sin embargo, esta teoría no es práctica si dichos sólidos tienen fisuras o defectos, ya que no tiene en cuenta la concentración de tensiones que se produce en los extremos de la grieta. Por ello, en estos casos es necesario utilizar la Mecánica de fractura, la cual se encarga de predecir la posible rotura o fisura de materiales que no tienen apenas plasticidad.

La Mecánica de fractura elástico lineal, creada en 1987 por Barsom y Rolfe, es una materia cuya metodología consiste en relacionar la magnitud y distribución del campo de tensiones en las zonas próximas al vértice de la grieta, con la tensión nominal aplicada al miembro estructural, con la forma, el tamaño y la orientación de esa grieta o fisura, y también con las propiedades de dicho material. Del mismo modo, se establece que todas las alteraciones que se producen por la rotura de dicho material, se llevan a cabo en zonas

próximas al frente de la grieta o fisura, mientras que el resto del sólido se sigue comportando de forma elástica lineal. Esas alteraciones se conocen como parámetro K, llamado Factor de Intensidad de Tensiones o FIT, que a su vez, está relacionado con el nivel de tensión nominal en el miembro ( $\sigma$ ) y el tamaño de la fisura ( $a$ ). Como resultado, todos los cuerpos que tienen defectos o fisuras, pueden clasificarse según los distintos niveles de K, de forma similar a la que se clasifican los elementos mecánicos o estructurales sin fallos según los niveles de tensión  $\sigma$ .

El fallo en la mayoría de los materiales se produce a causa de la propagación de fisuras o grietas. Para determinar la seguridad y la fiabilidad de las estructuras, es importante conocer la magnitud y la distribución del campo de esfuerzos en las proximidades de estas fisuras, algo que se lleva a cabo gracias al análisis tensional del componente en la Mecánica de fractura.

#### 1.5.1. Factores de intensidad de tensiones

Según estableció Irwin en 1957, los parámetros  $K_I$ ,  $K_{II}$  y  $K_{III}$  son los FIT en los Modos I, II y III, respectivamente, y dependen de las solicitaciones impuestas, de la geometría del sólido y el tamaño de la propia grieta.

#### 1.5.2. Tensiones y desplazamientos en el frente de fisura

Basándose en los estudios previos de Westergaard, Irwin descubrió que los campos de tensiones y desplazamientos que se producen en el frente de una fisura se propagan según el modo I de deformación, en función del factor  $K_I$ . Esto viene determinado por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \\ \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \\ \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{z=v(\theta_x+\theta_y)}$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$$

$$\begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} = \frac{K_I}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - 2\nu + \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right] \\ \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[2 - 2\nu - \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right] \end{pmatrix}$$

$$u_z = 0$$

Figura 12. Ecuaciones de tensión y desplazamientos en el frente de una fisura

En el siguiente esquema se puede observar el sistema de coordenadas y el tensor de tensiones en el extremo de una fisura.

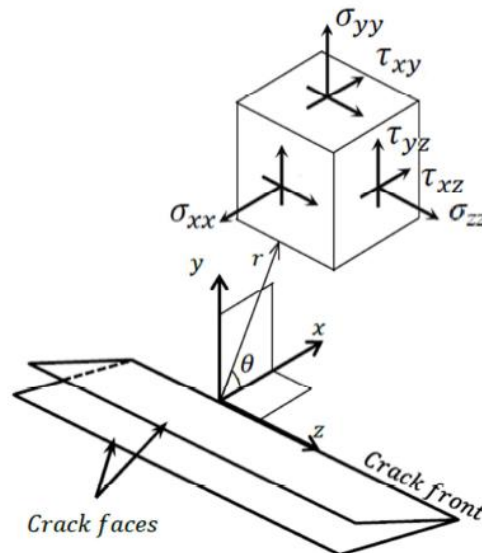


Figura 13. Sistema de coordenadas y tensor de tensiones en el extremo de una fisura

En este esquema,  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$  y  $\tau_{yz}$  son las componentes del tensor de tensiones;  $u_x$ ,  $u_y$  y  $u_z$ , los desplazamientos en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$ ;  $r$  y  $\theta$  las coordenadas polares. Como ya se ha dicho,  $K_I$  es el FIT en el modo I;  $\nu$  es el coeficiente de Poisson y  $G$ , el módulo de elasticidad transversal. Estas ecuaciones representan una deformación plana, ya que se trata del modo I de fractura, donde  $u_z=0$ . Estas ecuaciones demuestran que la distribución de las tensiones elásticas y de deformación en las proximidades del frente de fisura son invariantes en todos los elementos mecánicos sometidos a un mismo modo de deformación. Por lo tanto, la magnitud del campo de tensiones elásticas puede ser descrita por los Factores de intensidad de tensiones de los modos I, II y III. En consecuencia, la tensión aplicada, la forma y el tamaño de la fisura, y su configuración estructural, afectarán al Factor de intensidad de tensiones, pero no a la distribución de dichas tensiones. El Factor de intensidad de tensiones debe ser linealmente proporcional a la tensión, y estar relacionada con la raíz cuadrada de la longitud de la fisura. En conclusión, el FIT se relaciona con la magnitud de la tensión nominal aplicada,  $\sigma$ , al igual que la raíz cuadrada de la longitud de la fisura,  $a$ . El FIT para cualquier caso, tendría la siguiente forma.

$$K = \sigma \cdot \sqrt{a} \cdot f(g)$$

Donde  $f(g)$  es un parámetro adimensional que ha sido estudiado por Paris y Sih en 1965, Tada, Paris e Irwin en 1973 y Sih nuevamente, en 1973, y depende de la forma del objeto de estudio y de la geometría de su fisura.

La mayoría de las fracturas frágiles se producen en el modo I. Por lo tanto, la tensión de interés primario en la mayoría de las aplicaciones prácticas es  $\sigma_{yy}$ . Para que  $\sigma_{yy}$  sea máxima,  $\theta = 0$ , y por lo tanto:

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}$$

Según aumenta  $r$  (alejamiento del frente de fisura), la tensión  $\sigma_{yy}$  disminuye, manteniéndose el FIT  $K_I$  constante. De este modo,  $K_I$  describe el campo de esfuerzos alrededor de una fisura.

Si recolocamos dicha expresión, obtenemos como resultado que:

$$K_I = \sigma_{yy} \sqrt{2\pi r}$$

Por lo tanto, el  $K_I$  describe la intensidad del campo de de una fisura en cualquier elemento estructural, si  $f(g)$  se puede determinar. Las unidades de  $K_I$  son  $[\text{Pa} \cdot (\text{m})^{1/2}]$ , es decir, unidades de tensión multiplicadas por la raíz cuadrada de la distancia.

### 1.5.3. Deformación en el frente de fisura

Como muestran las ecuaciones anteriores, la tensión elástica en la proximidad del frente de fisura puede ser muy grande. De hecho, dichas magnitudes de gran tensión no se producen porque el material se somete a una deformación plástica, y crea una zona plástica que rodea el frente de fisura. El siguiente esquema muestra el cambio en la distribución de la componente  $y$  de la tensión, causada por esta deformación plástica localizada:

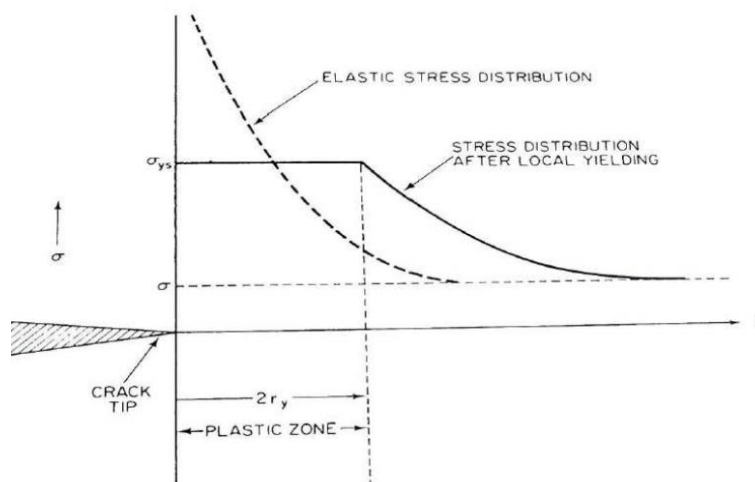


Figura 14. Distribución de la componente de la tensión  $\sigma_y$  en la región del frente de fisura



El tamaño de la zona plástica,  $r_y$ , se puede calcular a través de las ecuaciones del campo de tensiones tratando el problema en uno de los planos de tensión y estableciendo la componente y de la tensión,  $\sigma_y$ , igual a su límite elástico,  $\sigma_{ys}$ , de lo que se deduce [Irwin, 1960]:

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K}{\sigma_{ys}} \right)^2$$

#### 1.5.4. Tenacidad de fractura

Uno de los principios básicos de la Mecánica de fractura se basa en que la fractura inestable ocurre cuando el FIT en el frente de la fisura,  $K$ , alcanza un valor crítico. Para el modo I de deformación y también para pequeñas fisuras con deformación plástica, el Factor de intensidad de tensiones crítico se conoce como  $K_{Ic}$ .  $K_{Ic}$  representa la tenacidad a la fractura de un material, mientras que el  $K_I$  representa la intensidad de la tensión de una fisura en cualquier material. El  $K_I$  debe estar por debajo del  $K_{Ic}$  en todo momento, para evitar la fractura en los componentes con defectos.

Por lo tanto, se puede decir que el criterio local de fractura en el modo I es el siguiente.

$$K_I \geq K_{Ic}$$





# **CAPÍTULO II**

## **MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

### **O MEF**

- 2.1. Introducción al método
- 2.2. Ideas básicas sobre el MEF
- 2.3. Elementos básicos del MEF
  - 2.3.1. Elemento
  - 2.3.2. Nodo

## 2.1. Introducción al método

El *Método de los elementos finitos*, conocido también como MEF, es una herramienta muy utilizada en el mundo de la ingeniería. Su principal función es la de resolver problemas reales, lo cual sería prácticamente imposible a través de métodos tradicionales de cálculo. El MEF se utiliza en el diseño de productos y en su futura mejora, en aplicaciones de la industria y en la simulación de sistemas físicos, entre otros. La complejidad de problemas a los que se puede adaptar método ha aumentado notablemente desde sus inicios, estando presente en la actualidad en casi todos los ámbitos de la ingeniería, incluyendo el energético, el mecánico y el electrónico.

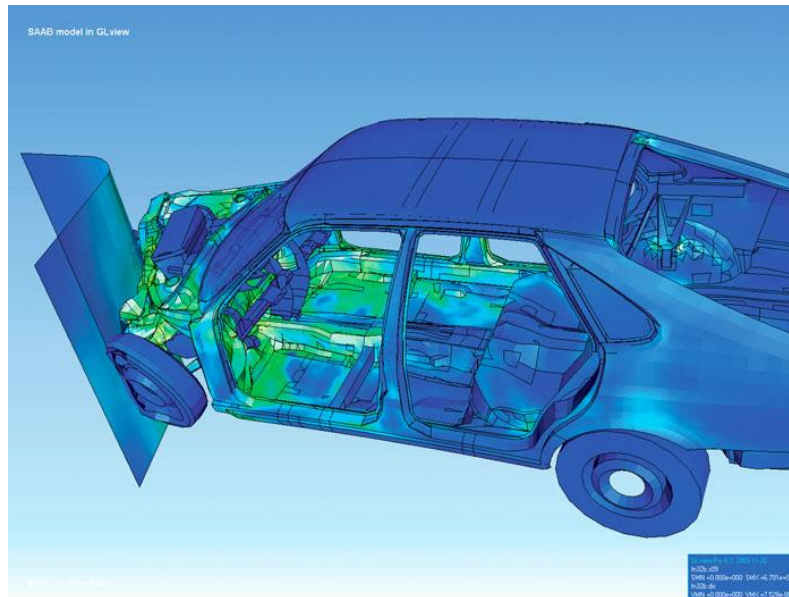


Figura 15a. Simulación del impacto de un vehículo con MEF

El *Método de los elementos finitos* permite realizar diseños cuyos resultados se aproximan en gran medida a la realidad, evitando de esta manera realizar experimentos con prototipos, en la gran mayoría de los casos, destructivos, lo que implica un gran ahorro de tiempo y dinero. De cualquier modo, tanto el uso de prototipos al final del diseño como el uso del MEF en las fases inicial e intermedia del desarrollo, siguen siendo útiles.

## 2.2. Ideas básicas sobre el MEF

El MEF busca obtener una solución numérica al problema por medio de la discretización del cuerpo o estructura, debido a que se conocen las ecuaciones que rigen el comportamiento físico del modelo, esto significa, realizar una división del diseño del problema en un gran número de partes denominadas elementos. Dichos elementos están conectados entre sí por medio de puntos denominados nodos. Gracias a estas divisiones y las relaciones entre ellas, se puede convertir el problema en un conjunto de elementos con un número finito de grados de libertad, para su posible resolución.



---

Para realizar un cálculo mediante un programa MEF, son necesarias tres fases:

- **Preproceso:** esta fase consiste en la definición de la geometría del modelo, además de definir las condiciones de contorno y cualquier valor que garantice mayor aproximación de los resultados.
  - Propiedades del material.
  - Ensamblaje de las piezas del modelo.
  - Definición de los contactos entre cuerpos.
  - Aplicación de cargas y/o presiones sobre el cuerpo.
  - Generación de la malla.
- **Cálculo:** se basa en realizar los cálculos necesarios para generar la solución del problema. Se suele decidir la configuración de los parámetros del cálculo, el número de iteraciones y el tipo de cálculos a realizar.
  - Selección de tipos de cálculo a realizar.
  - Selección de los parámetros de cálculo.
  - Definir número de iteraciones del problema.
- **Postproceso:** en esta última fase se tratan los resultados obtenidos de la fase anterior de cálculo, expresando los resultados con representaciones gráficas y tablas, exponiendo así los términos del problema de una manera mucho más sencilla y visual.

## 2.3. Elementos básicos del MEF

### 2.3.1. Elemento

El elemento es la subdivisión de un cuerpo, que conforma la esencia del estudio en el método de los elementos finitos. Se pueden emplear diferentes tipos de elementos dependiendo del tipo de análisis que se vaya a llevar a cabo.

Existen dos tipos diferentes de elementos 3D que se pueden usar en *ABAQUS*, elementos tetraédricos y elementos hexaédricos, ambos se muestran en la figura 15b. Los elementos tetraédricos están disponibles como primer (lineal) y segundo (cuadrático) orden, y los elementos hexaédricos están restringidos en primer orden para el modelo del Método de los Elementos Finitos Extendidos (XFEM).

Los elementos tetraédricos lineales utilizan un solo punto de integración para el cálculo de la rigidez y los elementos de segundo orden utilizan cuatro puntos para el cálculo de la matriz de rigidez. Los elementos hexaédricos con integración completa utilizan ocho puntos de integración y los elementos hexaédricos con integración reducida utilizan tan solo un punto de integración. Los elementos hexaédricos con integración completa de primer orden se designan como C3D8 y los elementos con integración reducida se designan como C3D8R en *ABAQUS*. Los elementos de primer orden tetraédricos se denotan como C3D6 y los de segundo orden (integración completa) como C3D10.

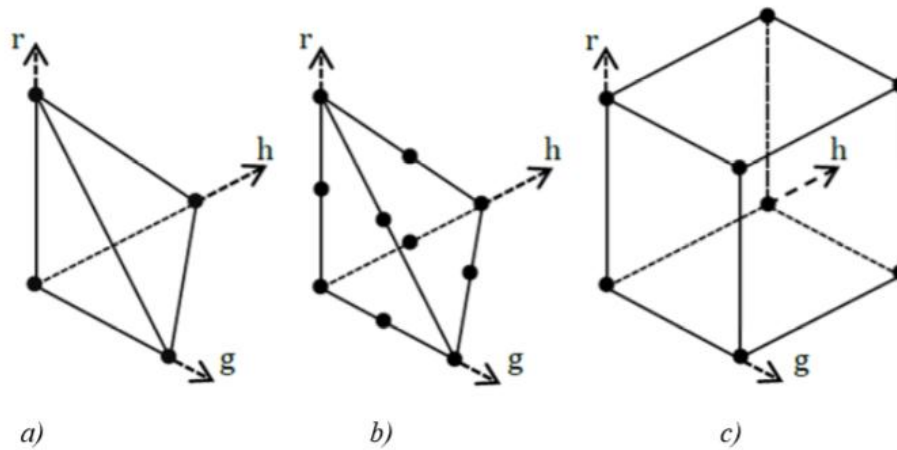


Figura 15b. Elementos permisibles en XFEM. a) Tetraedro de primer orden, b) Tetraedro de segundo orden, c) Hexaedro de primer orden

En el presente proyecto se va a llevar a cabo del estudio el problema con elementos hexaédricos debido a que no se ha llegado a unos resultados convergentes con elementos tetraédricos.

Los tipos básicos de elementos son:

- **Tipo sólido:** es el elemento estructural que suele aparecer en los modelos más comúnmente. Se pueden encontrar de diferentes tipos en función de la forma del cuerpo.

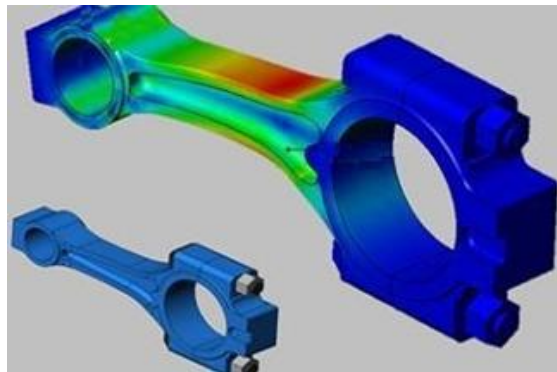


Figura 16. Elemento sólido

- **Tipo placa:** este tipo de elemento estructural se puede definir como una superficie de dos dimensiones que trabaja normalmente a flexión.

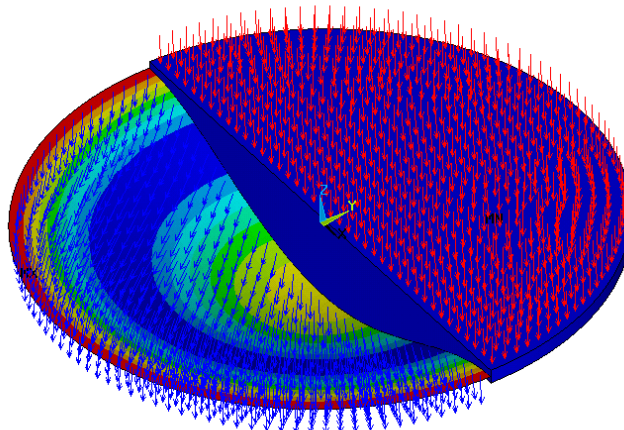


Figura 17. Elemento tipo placa

- **Tipo viga:** es un elemento estructural lineal que suele trabajar a flexión debido a que una de sus tres dimensiones, la longitud, predomina sobre las otras dos.

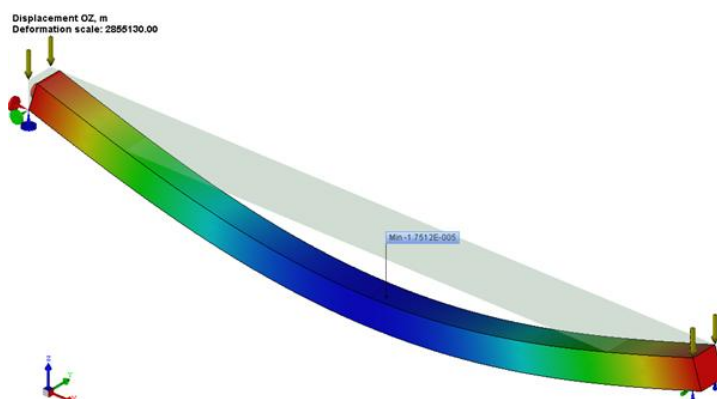


Figura 18. Elemento tipo viga

### 2.3.2. Nodo

Los nodos son los nexos de unión entre los elementos en los que se ha dividido el cuerpo objeto de estudio. De esta manera, cada nodo está ubicado en el espacio por medio de unas coordenadas, donde queda definido el número de grados de libertad de cada nodo. Un grado de libertad representa la posibilidad o no de un nodo de realizar un movimiento en una dirección al ser sometido a cargas externas. Dependiendo del tipo de elemento, los grados de libertad de un nodo indicarán los tipos de fuerzas y de restricciones que se transmitirán a través de él hasta el próximo elemento.

De esta manera, si se quiere transmitir un esfuerzo rotacional, el nodo que vaya a hacer de nexo entre los elementos deberá tener ese grado de libertad de rotación para poder transferir el esfuerzo. En caso de no disponer de dicho grado de libertad, la aplicación de ese esfuerzo sobre el nodo no causará ningún efecto en el análisis.







## CAPÍTULO III

### ABAQUS 6.10

- 3.1. Introducción
- 3.2. Interfaz gráfica de *ABAQUS*
- 3.3. *ABAQUS/CAE*

### 3.1. Introducción

Para el desarrollo de este trabajo se va a utilizar el programa *ABAQUS*, uno de los programas del *Método de Elementos Finitos* más potentes y versátiles del mercado, ya que cubre casi todas las vertientes del ámbito de la ingeniería, como pueden ser la transferencia de calor, la mecánica de la fractura, los procesos de conformado de materiales, la resistencia de materiales, etc.

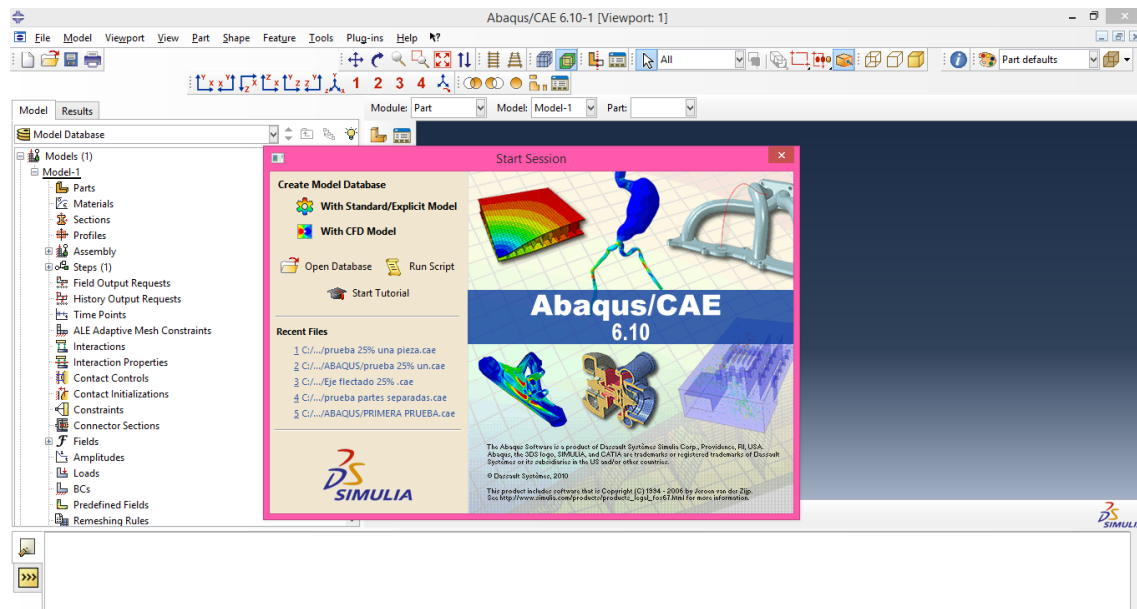


Figura 19. Pantalla inicial de Abaqus 6.10

Dicho programa consta de cuatro módulos:

- **ABAQUS/Standard:** dicho módulo formula el problema de elementos finitos en forma implícita. Se utiliza para todo tipo de problemas, exceptuando los de tipo dinámico.
- **ABAQUS/Explicit:** permite la resolución de problemas de tipo dinámico.
- **ABAQUS/CAE:** este módulo sirve para crear los diseños del MEF.
- **ABAQUS/Viewer:** se utiliza para visualizar y evaluar los resultados del problema.

*ABAQUS* ha ido creciendo considerablemente con el paso del tiempo en función de las necesidades de los usuarios, debido a que se necesitaba monitorizar el proceso de cálculo y observar los resultados de manera sencilla. Esto se consigue gracias a la interfaz gráfica que incorpora el programa, denominada *ABAQUS/CAE*, la cual se estructura en diferentes módulos que permiten desempeñar dichas funciones de manera sencilla.

### 3.2. Interfaz gráfica de ABAQUS

A continuación, se ilustra lo que se encuentra el usuario cuando inicia el programa ABAQUS:

- En amarillo: esta zona es la barra de comandos del programa, donde aparecen varias herramientas que nos permiten definir el modelo. Estas opciones, que nos aportarán una gran variabilidad, se irán modificando en función del módulo en el que se esté trabajando.

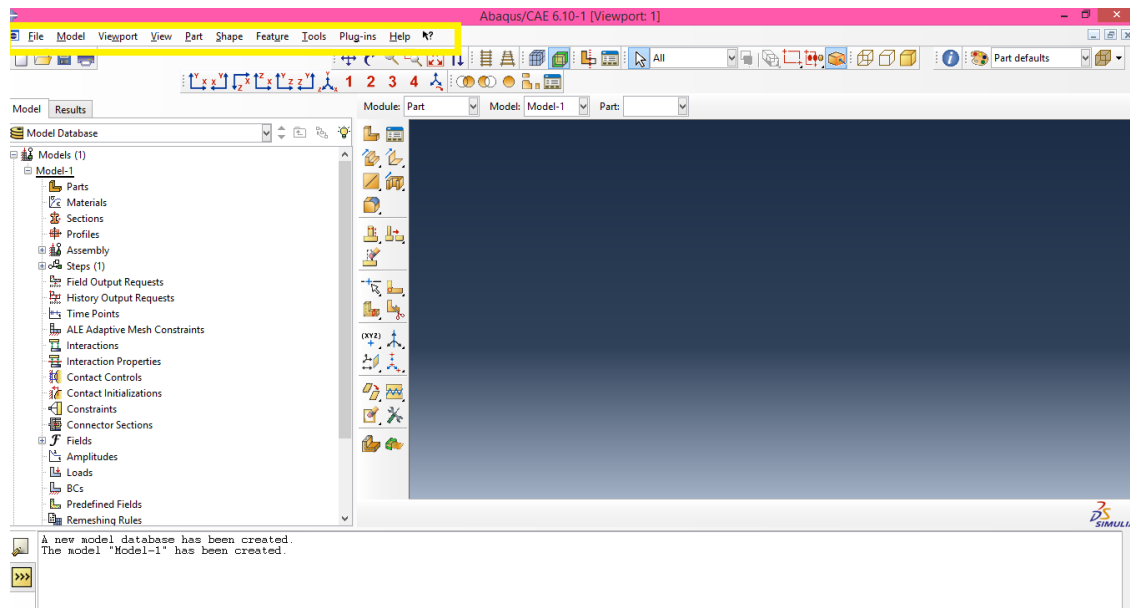


Figura 20. Interfaz gráfica de ABAQUS 1

- En gris: en esta parte de la interfaz se encuentran diferentes iconos que nos permiten manejar la visualización de manera rápida y sencilla, ya que permite mover el diseño, girarlo, dar o quitar zoom, ajustar el tamaño de las piezas a la pantalla, variar el aspecto del diseño, etc.

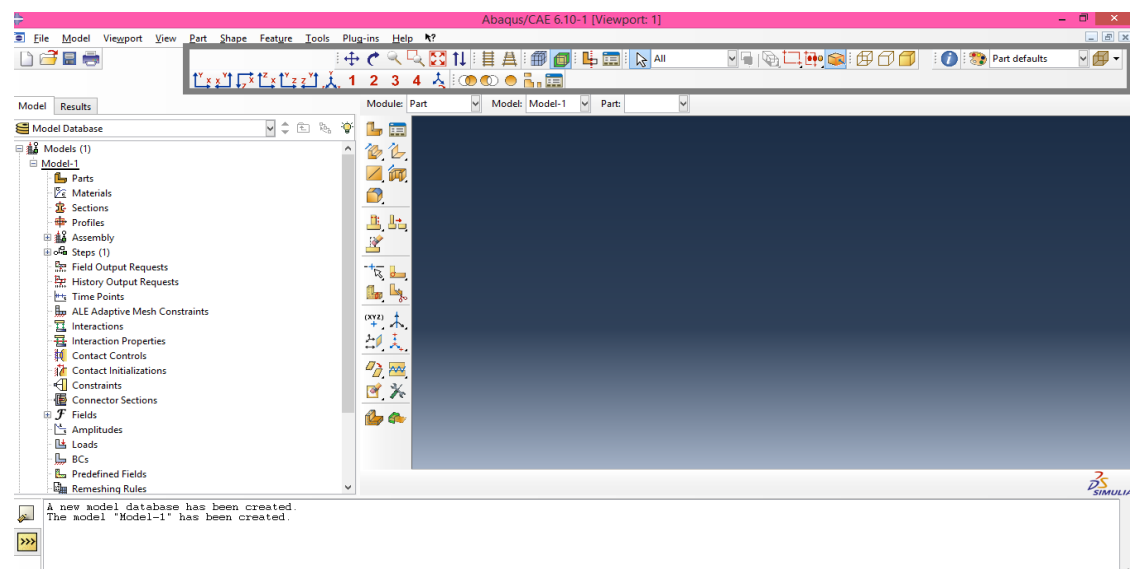


Figura 21. Interfaz gráfica de ABAQUS 2

- En verde: esta zona nos permite intercambiar de módulo de forma muy rápida, convirtiéndose en un comando muy utilizado en *ABAQUS*. Es importante seguir un orden lógico en la construcción del problema, ya que no se puede mallar el cuerpo si todavía no lo tenemos bien ensamblado, o si aún no hemos definido las condiciones de contorno.

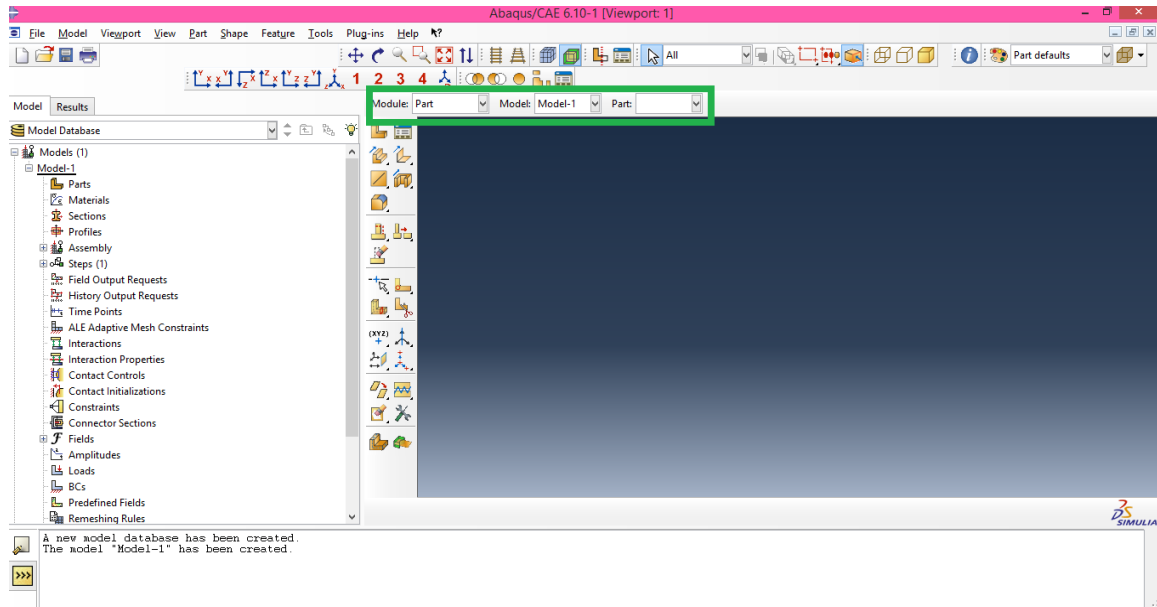


Figura 22. Interfaz gráfica de ABAQUS 3

- En naranja: en esta región de la pantalla se resumen todas las actividades que se han ido realizando para construir el diseño. Además, durante el proceso se permite realizar modificaciones de las condiciones ya creadas o borrarlas para crear unas condiciones nuevas.

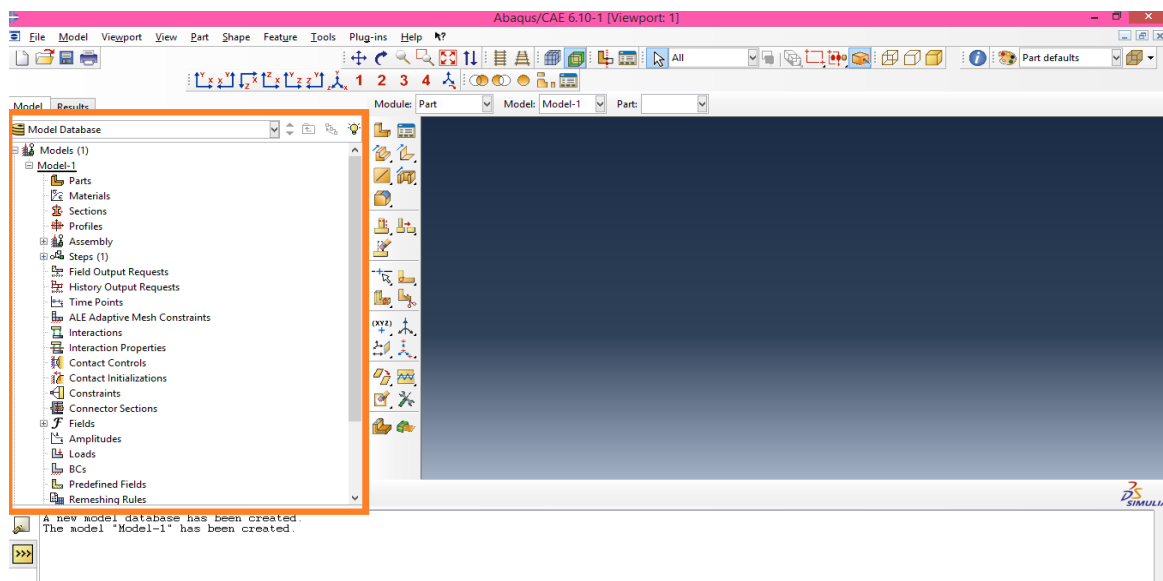


Figura 23. Interfaz gráfica de ABAQUS 4

- En negro: aquí aparecen los iconos más reseñables y utilizados de cada módulo, los cuales van variando dependiendo del módulo en el que nos encontremos. Esta barra está pensada para ganar tiempo ya que todos estos iconos se encuentran en la barra de comandos, y sólo con pinchar en ella aparecerían en un desplegable.

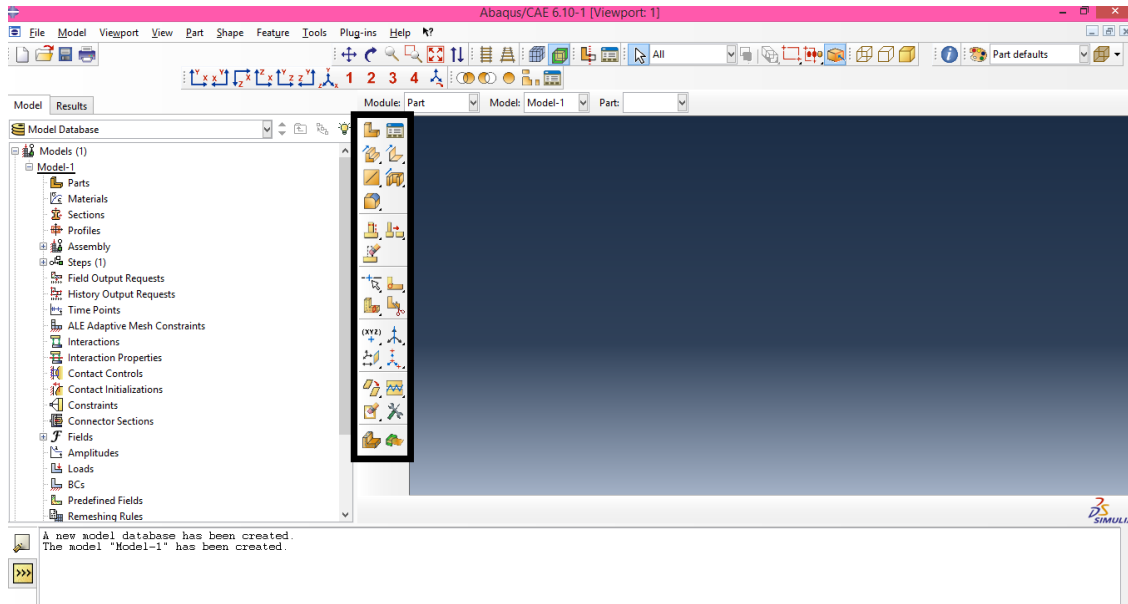


Figura 24. Interfaz gráfica de ABAQUS 5

- En rojo: esta parte de la interfaz se utiliza para la visualización de los cuerpos y “parts” que se crean en el problema, por lo tanto, es la parte en la que vemos de manera gráfica todos los cambios que vamos realizando en nuestro problema, como la forma de los cuerpos, las fuerzas que aparecen, las restricciones del modelo o la malla. En esta zona también se pueden visualizar los resultados del modelo una vez se han realizado los cálculos necesarios.

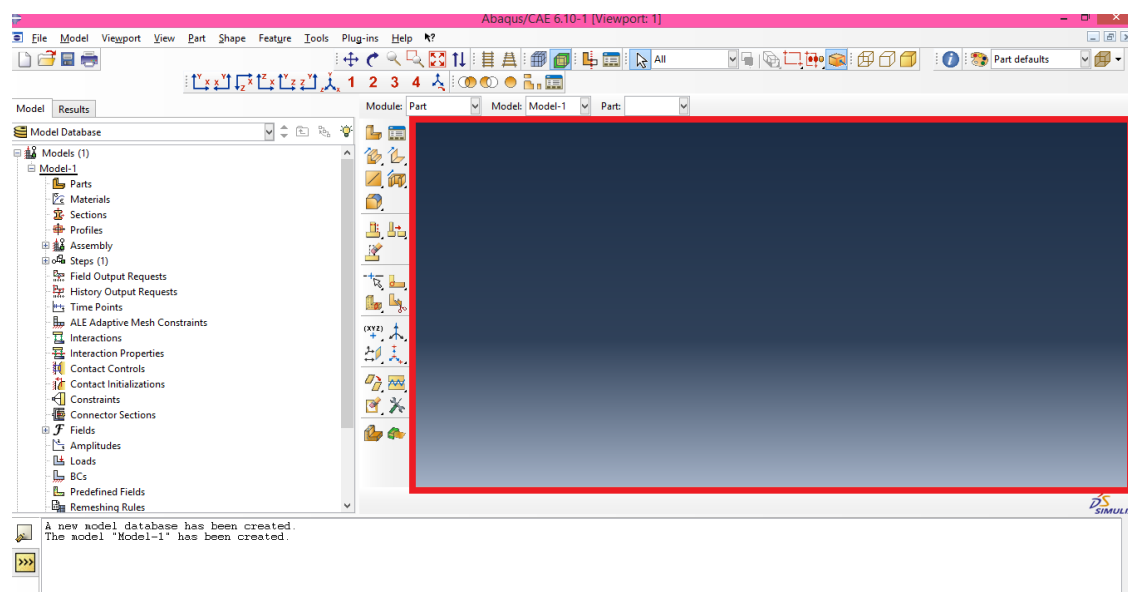


Figura 25. Interfaz gráfica de ABAQUS 6

- En azul: este es el cuadro en el que el programa muestra las operaciones que se realizan durante el diseño del problema. Además, desde él existe la posibilidad de dirigir la programación de manera manual, insertando en dicha parte las funciones correspondientes.

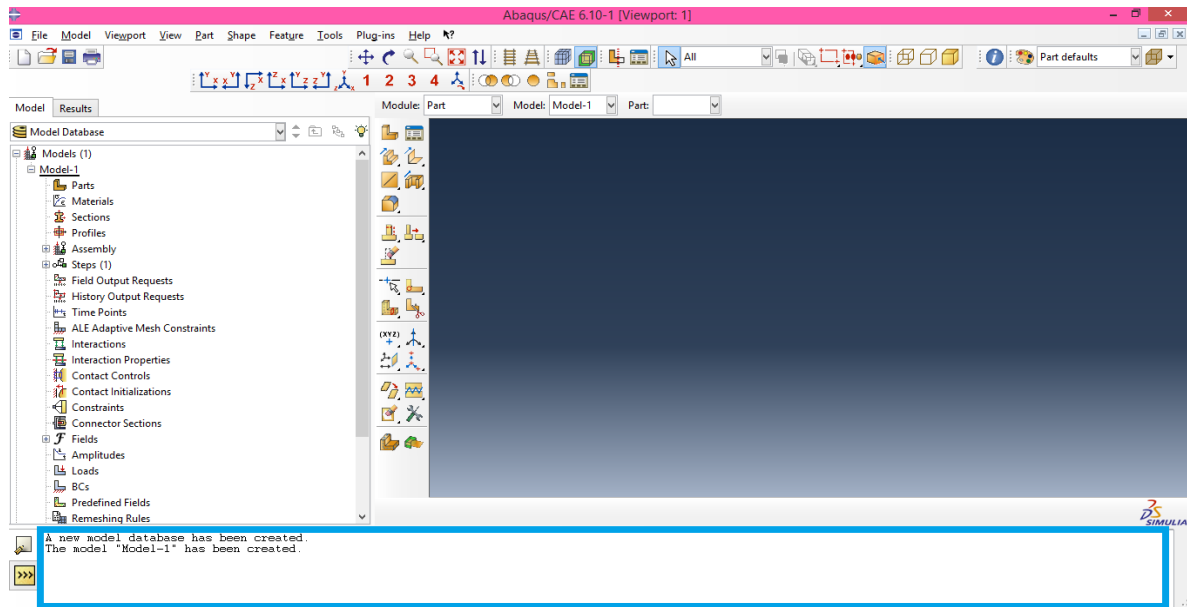


Figura 26. Interfaz gráfica de ABAQUS 7

### 3.3. ABAQUS/CAE

En ABAQUS/CAE se pueden diferenciar los siguientes módulos:

- **Part module** (Creación de piezas). En los diseños de elementos finitos pueden aparecer diferentes piezas o cuerpos. Estas piezas se crean en este módulo, bien definiendo su geometría ayudándose del módulo de diseño o bien importando geometrías que han sido definidas en otros programas de dibujo.

En este módulo se define el tipo de la pieza, si es rígida o deformable; y la forma que tiene, si es un sólido de revolución, una placa, una viga o un punto.

- **Property module** (Asignación de propiedades). Durante todo el programa se pueden realizar particiones en las piezas para hacer distinciones dentro de ellas. Esto es muy útil en este módulo ya que se pueden asignar diferentes tipos de materiales a una misma pieza en función de las particiones que se le realicen. Anteriormente a la asignación de materiales es necesaria la creación de estos, especificando al programa valores técnicos de cada material, como pueden ser la densidad, el Módulo de Young o el ratio de Poisson, entre otros.



- **Assembly module** (Ensamblaje del modelo). Las piezas que se diseñan en el módulo *Part module* han sido creadas en sistemas de coordenadas independientes unas de otras, de manera que es necesario crear un modelo final con todas las piezas ensambladas. Esto se realiza gracias al *Assembly module* que permite colocar las piezas donde se necesite por medio de traslaciones y rotaciones de las mismas.  
Además, en este módulo se pueden crear tantas unidades de cada pieza diseñada en el *Part module* como sean necesarias.
- **Step module** (Creación de pasos). Las simulaciones en el Método de elementos finitos pueden constituirse en diferentes etapas o pasos, como por ejemplo, una máquina que trabaja en ciclos de carga y descarga. Gracias a este módulo se pueden especificar las características generales de cada etapa o paso.  
En este módulo también se pueden seleccionar los parámetros de salida (tensiones, desplazamientos, temperatura, etc.) que se necesitan calcular por medio de la simulación, algo esencial para no crear archivos con excesivo tamaño.
- **Interaction module** (Definición de interacciones). Este módulo sirve para definir las interacciones y contactos que existen entre las piezas del diseño. En los contactos se definen las áreas que tienen conexión o que pueden contactar durante la simulación del problema.  
Además de pueden establecer uniones e interacciones.
- **Load module** (Creación de fuerzas y condiciones de contorno). En este módulo se especifican las fuerzas externas, presiones Y momentos que aparecen en el problema.  
También, se pueden especificar las condiciones de contorno del modelo limitando desplazamientos, fijando velocidades, etc.  
Todas estas especificaciones se pueden ver esquematizadas en el diseño, lo que mejora la visualización del problema.
- **Mesh module** (Generación de la malla). Llegados a este punto, en el cual ya se tiene definido el problema, sólo falta especificar la malla de elementos finitos para llevar el diseño a estudio. El programa permite al usuario definir la técnica del mallado (libre, estructurada o por barrido), además de seleccionar la forma de los elementos (hexagonal, tetraédrica o triangular). Una vez seleccionadas estas características, el programa se dispone a generar la malla en función de nuestras especificaciones.  
  
Esta versión del programa *ABAQUS*, al ser una versión para estudiantes, se encuentra limitada a 1000 nodos, por lo que el estudio no será tan preciso como si hubiese sido realizado con versiones más modernas sin limitaciones de nodos.
- **Job module** (Monitorización del problema). Este módulo sirve para iniciar la simulación y dirigir el progreso de ésta. El usuario tiene la posibilidad de elegir el tipo de análisis y los recursos computacionales con los que se va a realizar el estudio (memoria utilizada, número de procesadores, etc.).



Antes de realizar los cálculos para resolver el problema, el programa comprueba si el diseño está listo para llevarlo a estudio o si por el contrario, existen errores que impiden la resolución del problema. Una vez realizados los cálculos, el programa genera un archivo con los valores de las variables de salida seleccionadas anteriormente, que se podrán ir viendo en el módulo de visualización sin necesidad de esperar a que concluya el estudio.

- **Visualization module** (Visualización). Este módulo está diseñado para la visualización de los resultados procedentes del estudio. En él existe la posibilidad de visualizar y tratar la información creada por ABAQUS/Standard, de tal manera que se puede ver la variación de los valores de las variables a lo largo de los pasos del problema, como puede ser la tensión en toda la pieza o los desplazamientos. Además, el programa tiene diferentes posibilidades gráficas en las que se puede ver de manera más realista la evolución de la pieza durante la simulación.

Dicho módulo también se puede adquirir de manera independiente, sin necesidad de obtener todo el programa completo, con el nombre de *ABAQUS/Viewer*.

- **Sketch module** (Diseño de bocetos). Este último es un módulo de dibujo, que permite crear bocetos o figuras geométricas para luego ser utilizados en otras partes del programa, como el módulo de creación de piezas.

Este módulo es una herramienta similar a un programa CAD, que permite definir la geometría del problema de elementos finitos.







# **CAPÍTULO IV**

## **DISEÑO DEL PROBLEMA EN ABAQUS**

- 4.1. Diseño de las piezas o “parts”
- 4.2. Definir propiedades del material
  - 4.2.1. Crear material
  - 4.2.2. Crear sección
  - 4.2.3. Asignar sección
- 4.3. Ensamblar el modelo
  - 4.3.1. Colocación del eje
  - 4.3.2. Realizar cortes
  - 4.3.3. Colocar grieta
- 4.4. Definir grieta
- 4.5. Definir el paso
- 4.6. Definir los parámetros de salida
- 4.7. Definir cargas
- 4.8. Definir restricciones
- 4.9. Definir mallado
- 4.10. Definir trabajo (job)

#### 4.1. Diseño de las piezas o “parts”

El primer paso para modelar un problema en *ABAQUS*, es diseñar las piezas gracias al modulo *PART*.

El eje se va a modelizar como un perfil de revolución con las dimensiones del eje real.

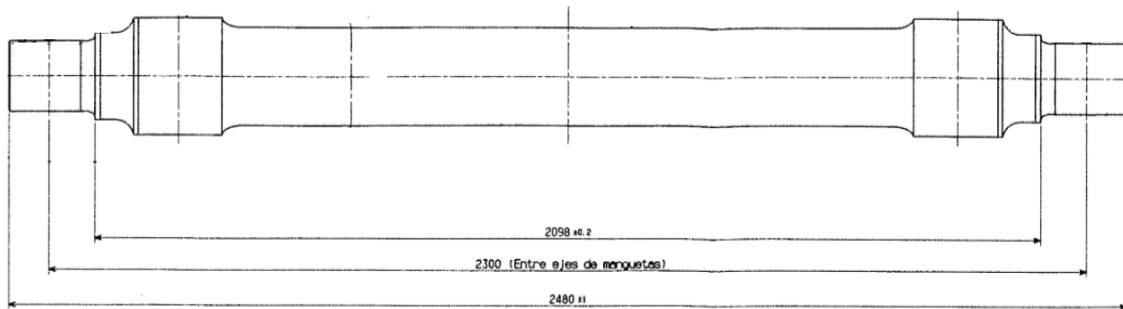


Figura 27. Plano del eje real

Para dibujar el eje se debe abrir el modulo de creación de piezas, *module PART*, y en el *Model tree*, *Models* > *Model 1* > *Part*. El programa nos permitirá seleccionar las diferentes opciones dentro de la siguiente ventana *Create Part*:

Name: Eje empotrado  
Modeling Space: 3D  
Type: Deformable  
Shape: Solid  
Type: Revolution  
Approximate size: 3

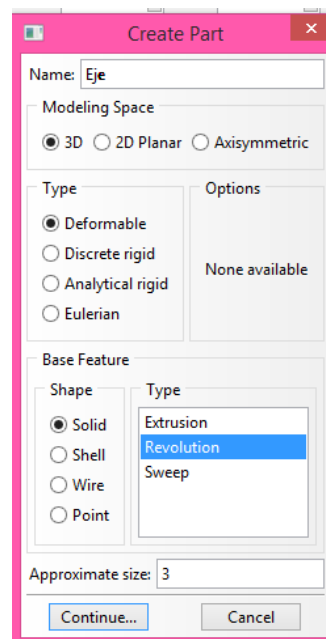


Figura 28a. Características del eje ferroviario

A continuación, se define el perfil del cuerpo geométrico. Al ser un perfil de revolución, es imprescindible la creación del eje de revolución de la pieza que permitirá dar forma a la pieza.

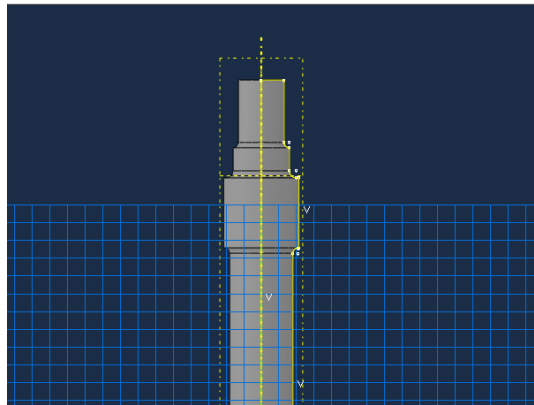


Figura 28b. Perfil de revolución del eje ferroviario

Se ha decidido modelar medio eje, ya que al ser simétrico las tensiones que aparecerían son las mismas en ambos extremos. Por lo tanto nos podemos permitir dibujar medio eje, pudiendo de esta manera centrar la atención en la zona donde aparece la grieta. Gracias a esto, cuando llegue el momento de definir la malla se podrá aumentar el número de elementos para mejorar los resultados sin elevar de manera drástica los tiempos de cálculo.

De la misma manera, se va a definir el perfil de la grieta, con la diferencia de que en la ventana *Create Part* se elegirán las siguientes opciones:

Name: Grieta  
Modeling Space: 3D  
Type: Deformable  
Shape: Shell  
Type: Planar  
Approximate size: 1

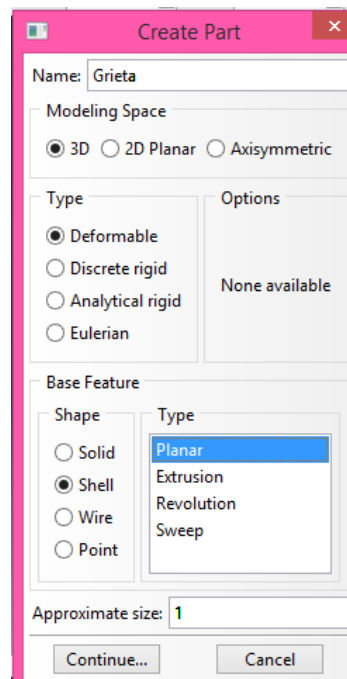


Figura 29a. Características de la grieta

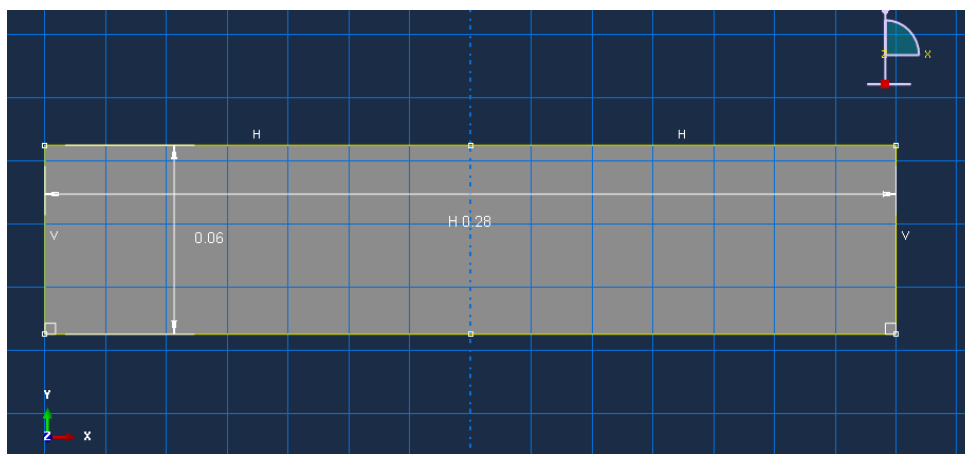


Figura 29b. Diseño de la grieta

## 4.2. Definición de las propiedades del material

En esta sección se definen las propiedades de los materiales. En este caso, solo va a existir un tipo de material, el del eje. Dicho eje está construido en acero AISI 1050.

ABAQUS no tiene una biblioteca, con diferentes tipos de materiales, como pueden tener otros programas, por lo que se necesita introducir las propiedades del material en el programa.

Se va a introducir la densidad del acero, el módulo de Young y el coeficiente de *Poisson*. Con estas propiedades queda definido el material sin necesidad de aportar otros valores. Solo en el caso de que la pieza supere el límite elástico, sería necesario introducir al programa más datos para continuar con la resolución del problema.

### 4.2.1. Crear material

Para introducir los valores de las propiedades se debe abrir el modulo de asignación de propiedades, modulo *PROPERTY*, una vez allí, en el menú Model Tree > Materials > Edit Material, en la ventana emergente se introducirán los datos del acero:

- *Mass density*: 7820 Kg/m<sup>3</sup>
- *Young's Modulus*: 210 GPa
- *Poisson's Ratio*: 0.27

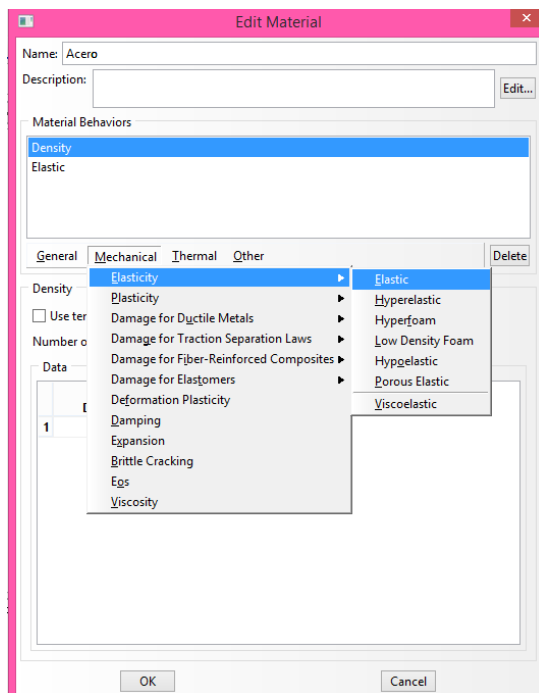


Figura 30a. Pasos para definir material I

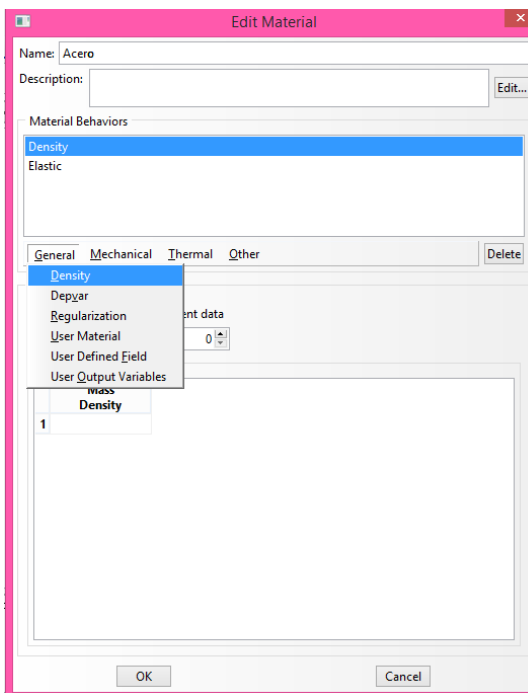


Figura 30b. Pasos para definir material II

#### 4.2.2. Crear sección

Para crear la sección del material se debe ir a *Toolbox area* y marcar la opción *Create Section*. En la ventana emergente se marcará lo siguiente:

- *Name*: Acero
- *Category*: Solid
- *Type*: Homogeneous

En la siguiente ventana *Edit Section* se debe elegir el material creado anteriormente.

En la siguiente figura se muestran los pasos para la creación de la sección:

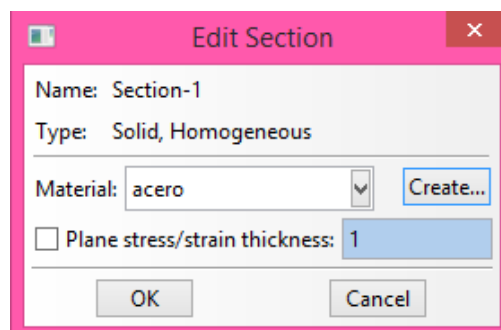


Figura 31. Crear sección I

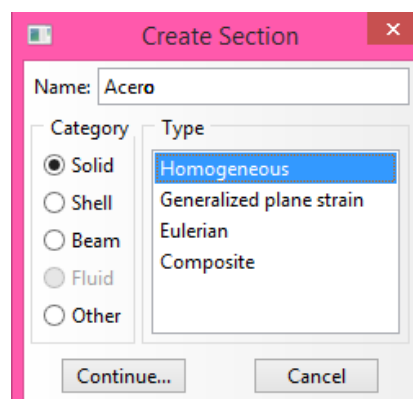


Figura 32. Crear sección II

#### 4.2.3. Asignar sección

Para asignar la sección creada en el paso anterior, es preciso ir al *Toolbox area* y elegir la opción *Assign Section*. A continuación, se elige la pieza a la cual se le va asignar la sección, en nuestro caso sería el eje, y en la ventana emergente *Edit Section Assignment* se selecciona la sección correspondiente para asignar las propiedades a la pieza.

Si los pasos descritos han sido bien realizados, el eje debería cambiar de color, en nuestro caso debe aparecer de color verde.

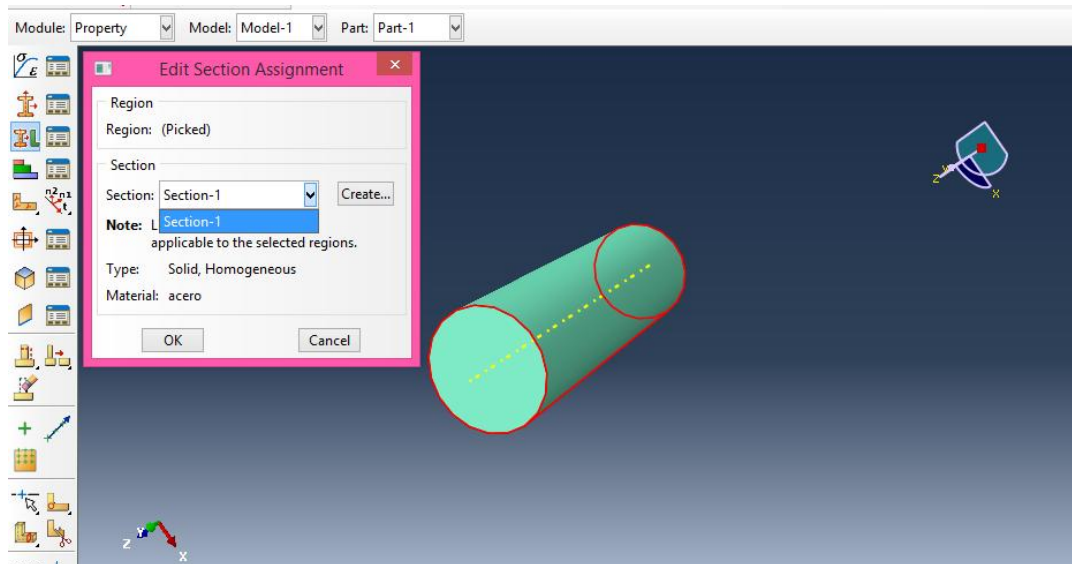


Figura 33. Asignar material al eje ferroviario

La asignación de propiedades debe hacerse únicamente sobre el eje, la grieta no precisa de esta definición, ya que en ABAQUS existe una manera de definir las grietas como se verá más adelante.

### 4.3. Ensamblar el modelo

#### 4.3.1. Colocar el eje

Para el correcto ensamblaje del modelo, es necesario definir las posiciones en el espacio de las diferentes partes del eje, además de las relaciones existentes entre dichas partes.

Para ello, se debe abrir el módulo de ensamblaje del modelo, y en el *Model Tree*, se escoge la opción *Instances* y en la ventana emergente *Create instance > Instance Type*, se marca la opción *Independent*, ya que el eje es una pieza que no depende de ninguna otra, por lo que podrá ser mallada de manera independiente.

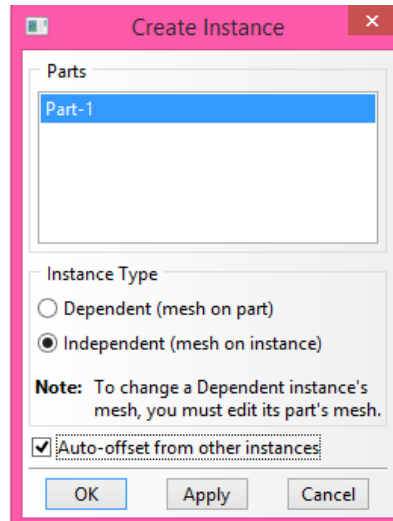


Figura 34. Creación de instancia

La opción *Auto-offset from other instances* es muy útil a la hora de colocar diferentes piezas o *parts*, ya que se van colocando una al lado de la otra para que no se solapen, y se visualicen todas completamente.

#### 4.3.2. Realizar cortes

Una vez colocado el eje en su posición, se pasa a definir la posición de la grieta en el espacio. Para ello se necesita primero definir una serie de puntos que nos servirán de apoyo para llevar la grieta a su posición final. Además, dichos cortes serán útiles más adelante cuando se necesite definir las fuerzas que intervienen en el modelo y las condiciones de contorno.

Para crear los cortes, se va a utilizar la función de creación de planos. Para ello, se debe desplegar la opción *Tools > Datum*, en la ventana emergente se marcará la opción *Type (Plane)*, y de las diferentes opciones que aparecen, se va a trabajar con *Offset From Principal Plane*, la cual permite crear un plano paralelo a uno de los planos principales.

En la siguiente imagen se muestra la ventana *Create Datum*, con la opción seleccionada:

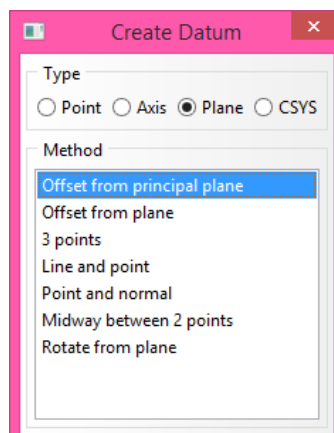


Figura 35. Creación del plano de corte



A continuación, se desplegará la opción *Tools > Partition*, en la ventana que aparece se debe elegir la opción *Type (Cell)*, y de las diversas opciones que da al programa, se selecciona *Use datum plane*, que nos va a permitir seleccionar el plano de corte con el que queremos realizar dichos cortes.

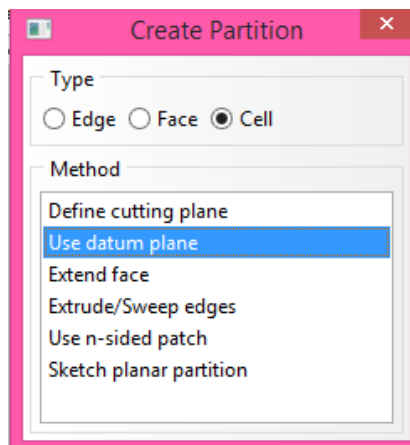


Figura 36. Crear partición

En la siguiente figura se puede ver el eje con los planos creados y los cortes realizados para ayudar en la colocación de la grieta en la sección que corresponda, en nuestro caso será el segundo cambio de sección del eje, aunque esto se explicará más detalladamente en el punto 5.2.

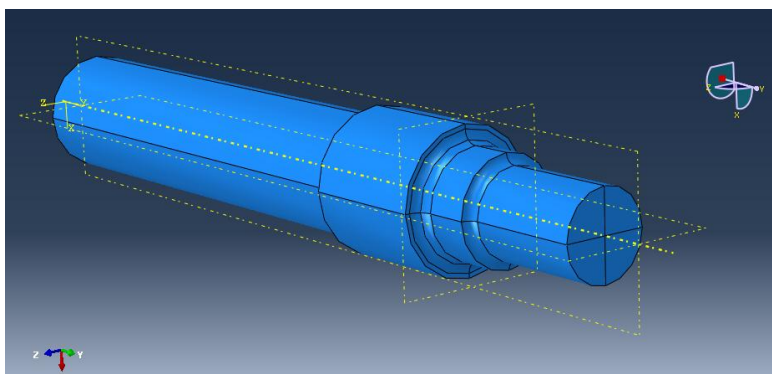


Figura 37a. Eje ferroviario con las particiones creadas

#### 4.3.3. Colocar grieta

Para situar la grieta, primero se debe girar utilizando la opción *Rotate Instance* del módulo *Assembly*, que nos permitirá rotar la grieta el ángulo que deseemos por medio de un eje de giro que definiremos con dos puntos. En nuestro caso habrá que girarla 90 grados para que se sitúe verticalmente a la sección donde se va a colocar.

Una vez girada la grieta, se pasa a colocarla en su posición correspondiente. Para dicho desplazamiento se usa la opción *Translate Instance* del módulo *Assembly*, y

pinchando en el punto de origen primero, y en el punto final después, deberá quedar situada donde se desee.

A continuación, en la figura 37b, se muestra el eje ferroviario con la posición final de la grieta:

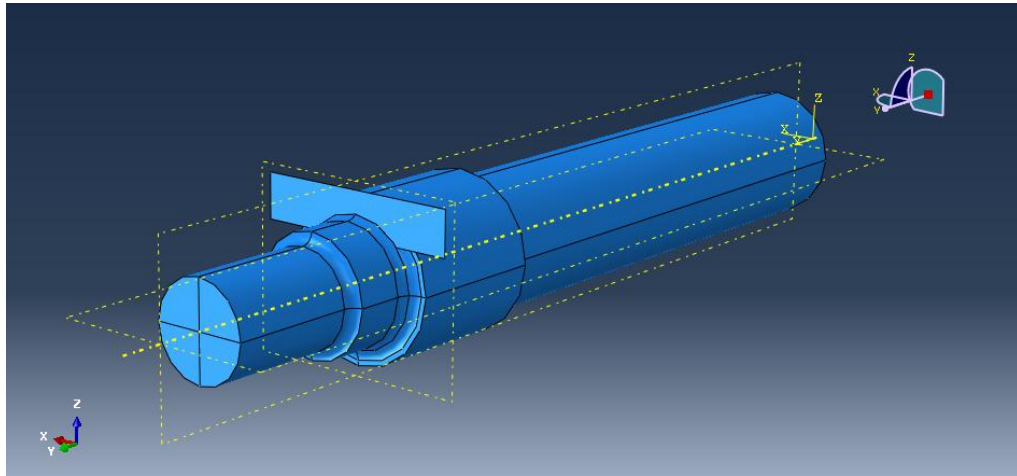


Figura 37b. Eje ferroviario con la grieta situada

#### 4.4. Definir grieta

Para que el programa reconozca la pieza que se acaba de colocar como una grieta dependiente del eje, son necesarios una serie de pasos.

Primero se debe ir al modulo de definición de interacciones, aquí, se desplegará el menú *Special*, y se seleccionará la opción *Crack > Create* como se puede ver en la siguiente imagen:

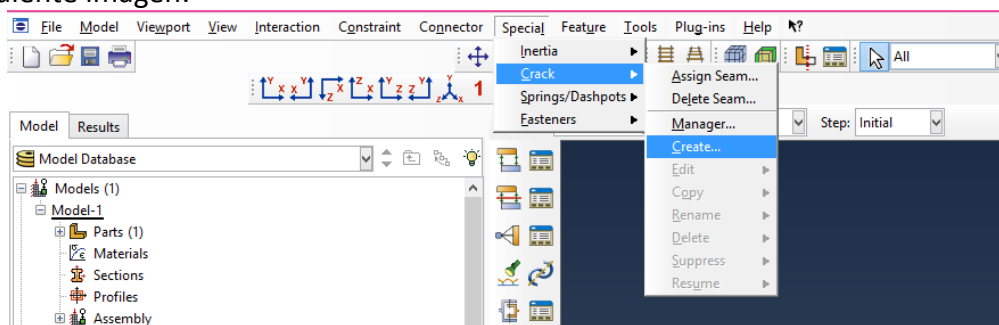


Figura 38a. Creación de la grieta

En la ventana que aparece se define el tipo de grieta con el que se va a trabajar, que en nuestro caso será XFEM. El siguiente paso sería definir el dominio de la grieta, que sería el eje. Aparecerá la siguiente ventana: *Edit Crack*, en la que debemos deseleccionar la opción *Allow crack growth*, para no permitir el crecimiento de la grieta, debido a que ABAQUS no permite estudiar el Factor de Intensidad de Tensiones en una grieta donde existe crecimiento.

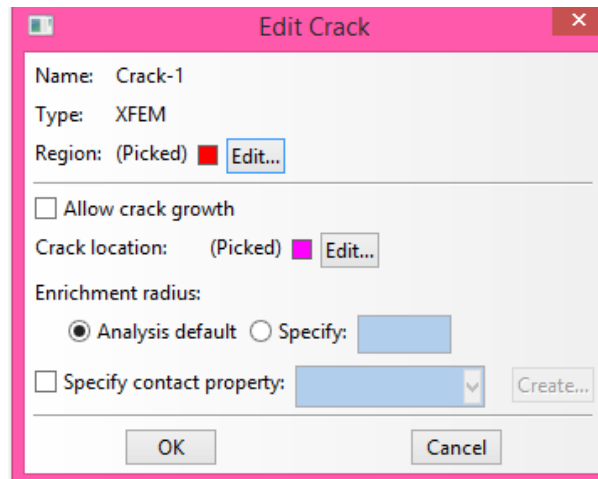


Figura 38b. Definición de la grieta

Para terminar de definir la grieta, se precisa localizar la posición de la grieta pinchando en la opción: *Edit Crack location*.

El radio de enriquecimiento no se debe especificar, por lo que dejaremos la opción que viene por defecto: *Analysis default*.

#### 4.5. Definir el paso

Para la definición del paso es importante variar ciertos valores con la idea de facilitar la convergencia en el análisis del modelo.

Procedure Type: General  
Option: Static, General

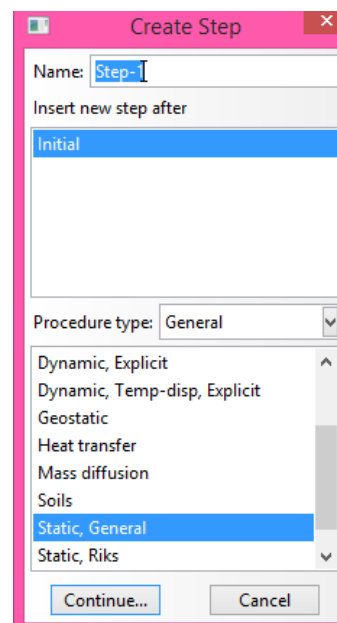


Figura 39. Creación del paso



En primer lugar se selecciona el módulo de creación de pasos. Se elegirá la opción *Create Step* y se deben seleccionar las opciones que se explican a continuación:

Si se quiere facilitar la convergencia en el análisis del modelo se debe aumentar el máximo número de incrementos y disminuir el tamaño de cada incremento, tal y como se aprecia en la siguiente figura:

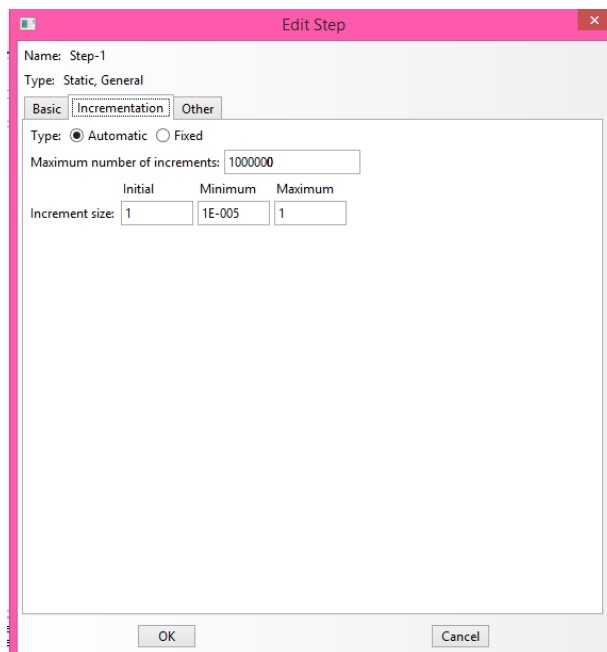


Figura 40. Definición del paso

Para seguir facilitando la convergencia del análisis, se pueden realizar otros cambios, como por ejemplo desplegando el menú *Others > General Solution Controls > Edit > Step-1*. Aparecerá una ventana con el nombre de *General Solution Controls*, donde se marca la opción de *Specify*. A continuación, se selecciona la pestaña *Time Incrementation*, y se debe marcar la casilla *Discontinuous analysis*. Dichos pasos se pueden apreciar en la siguiente figura:

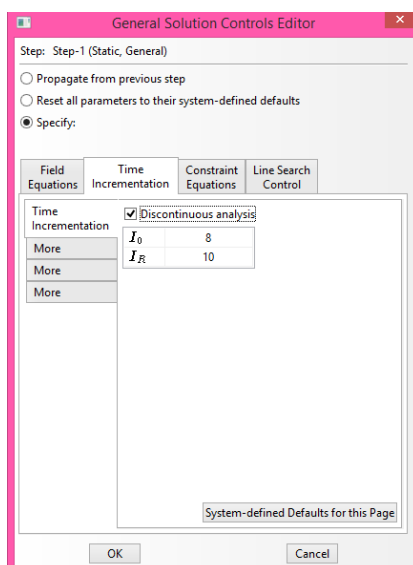


Figura 41. Paso 1 para la mejora de la convergencia

Otro cambio importante que favorece la convergencia sería cambiar el valor de  $I_A$  en la primera pestaña de *More* de 5 a 20:

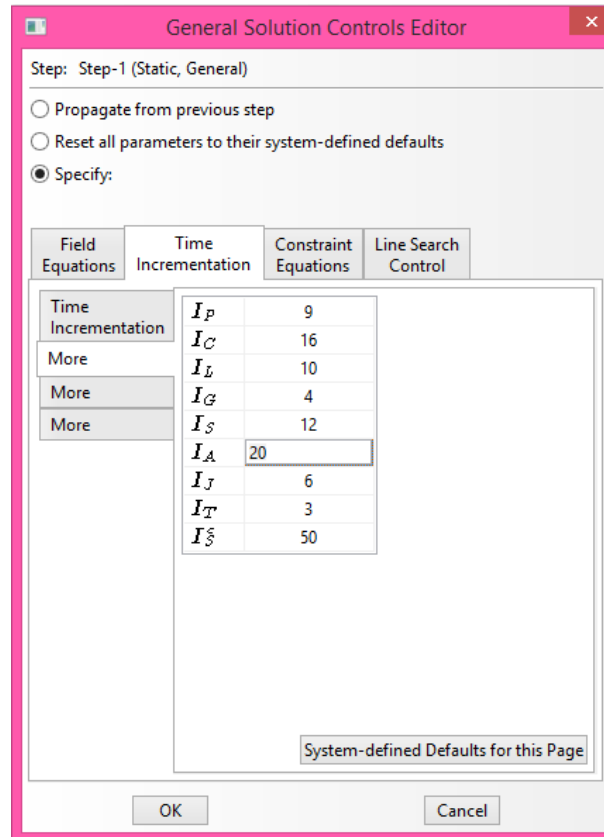


Figura 42. Paso 2 para la mejora de la convergencia

#### 4.6. Definir los parámetros de salida

Para la definición de los parámetros de salida se debe ir al módulo de creación de pasos, y seleccionar la opción de *Field Output Manager*, aquí se le da a editar y surgirá una ventana denominada *Edit Field Output Request*, donde se seleccionará los parámetros que se necesiten en nuestro estudio.

Dichos parámetros son :

- Stresses > Stress
- Displacement/Velocity/Acceleration > Translation and Rotation
- Failure/Fracture > PHILSM
- State/Field/User/Time > STATUS XFEM

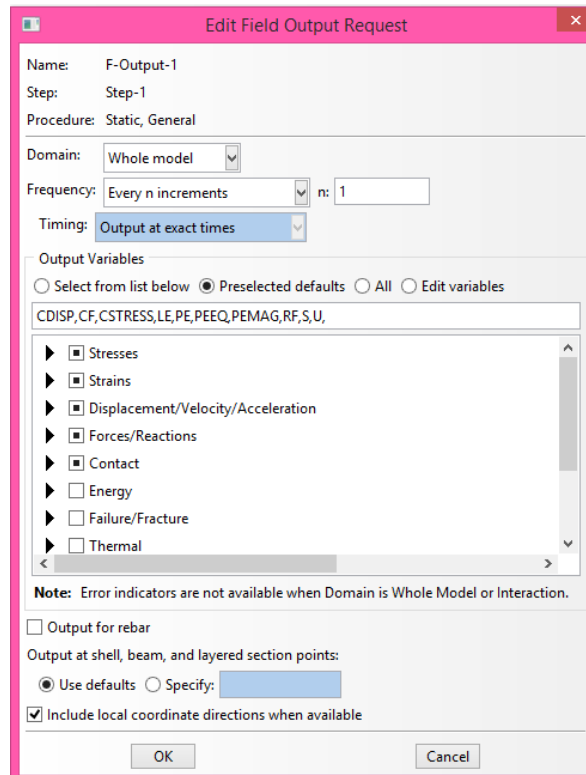


Figura 43. Definición de los parámetros de salida del eje 1

También se deben variar los parámetros en *History Output Manager*, aunque aquí se va a hacer diferenciación entre el modelo completo y la grieta.

Para el modelo completo valdrá con editar el archivo creado de *History Output Requests* y como se ha hecho anteriormente, en la ventana *Edit History Output Request*, se seleccionará el parámetro referente a fractura: *Failure/Fracture*.

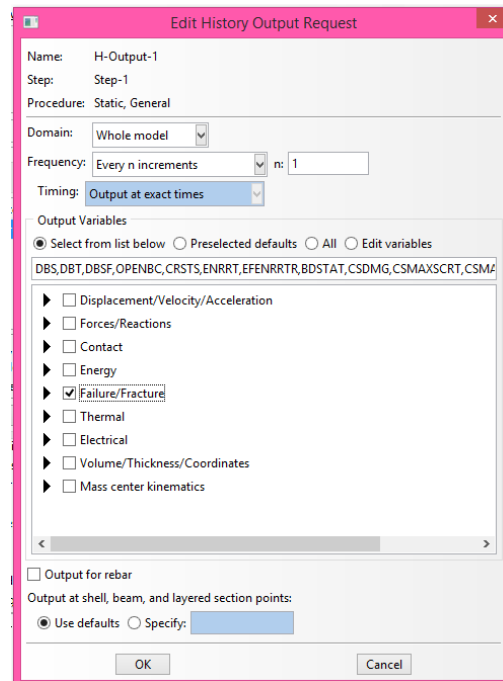


Figura 44. Definición de los parámetros de salida del eje 2

Para definir los parámetros referentes a la grieta, se debe crear un archivo en *History Output Manager*, y en la ventana *Edit History Output Request* se deben seleccionar las siguientes opciones:

- Domain > Crack
- Frequency > Last Increment
- Number of contours: 12
- Stress intensity factors > Crack initiation criterion: Maximum tangential stress

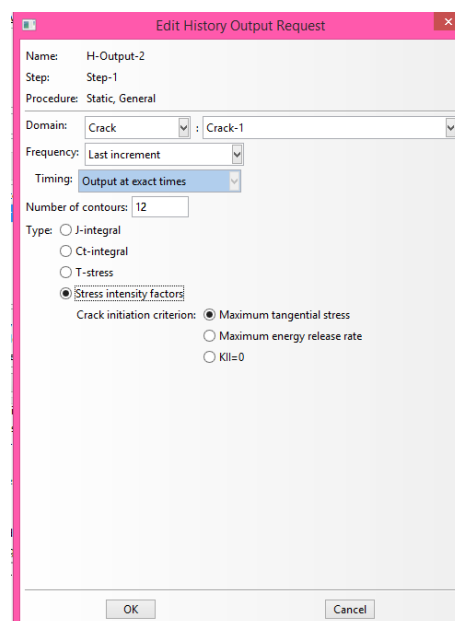


Figura 45. Definición de los parámetros de salida de la grieta

#### 4.7. Definir cargas

Para la definición de las cargas que intervienen en el modelo, se debe abrir el módulo de Creación de fuerzas y condiciones de contorno, y seleccionar la opción *Create load*, aparecerá una ventana donde se deben seleccionar las siguientes opciones:

- Step > Step-1
- Category > Mechanical
- Types for Selected Step > Surface traction

Una vez marcadas estas opciones, habrá que elegir la superficie en la que se va a aplicar la fuerza, o presión en nuestro caso. Dicha superficie es el semicilindro que soportaría la carga en la realidad, está situado en la parte exterior en voladizo del eje, y para poder seleccionarlo es necesario haber realizado un corte en la pieza que divida a esta en dos partes iguales.

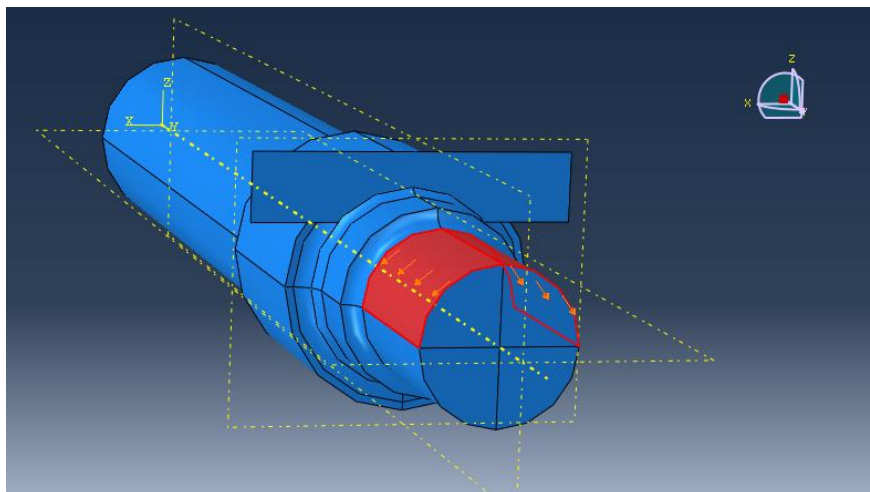


Figura 46. Superficie de aplicación de la presión

Dicho corte se puede realizar mediante las diferentes posibilidades que ofrece el programa, utilizando los iconos que aparecen en la parte inferior de la sección *Toolbox area*.

Para obtener el corte de manera rápida y fácil, se debe crear un plano que pase por el centro del eje, en nuestro caso, dicho plano era uno de los planos principales del programa, en concreto el plano XY. Una vez creado el plano correspondiente, se pasa a realizar el corte del eje mediante la opción *Partition Cell: Use Datum Plane*, y simplemente con seleccionar las partes que queremos cortar, en nuestro caso sería todo el eje, y el plano de corte anteriormente creado, quedaría seccionada la pieza para la colocación de la carga.



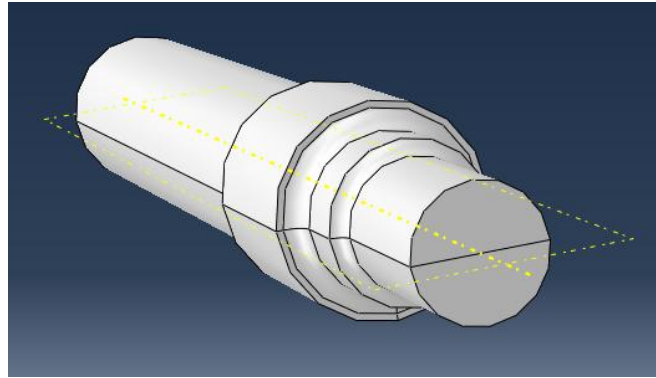


Figura 47. Eje ferroviario con plano de corte

Para terminar de definir la presión que se ejerce sobre el eje, una vez seleccionada la superficie debe aparecer la ventana emergente *Edit Load*, en la que se marcarán las siguientes opciones:

- Distribution > Uniform
- Traction > shear

La dirección de la aplicación de la presión debe ser perpendicular al plano de corte realizado en el paso anterior, para ello el programa nos pedirá dos puntos que definirán dicha dirección. Es muy importante tener en cuenta, qué vector de dirección se crea ya que se está definiendo también el sentido de la presión.

Por último, quedaría definir la magnitud que va a tomar la presión, es decir, el valor que alcanza dicha presión. Al ser una fuerza superficial, se debe calcular la presión que ejercen las 25 toneladas sobre la pieza. Por lo que la carga que soporta cada extremo sería:

$$Peso = \frac{25}{2} = 12,5 \text{ t}$$

Como ya se ha comentado anteriormente, la presión se va a situar sobre la mitad superior del eje en voladizo, la cual tiene un área de:

$$\text{Área} = \frac{\pi \cdot L \cdot D}{2} = \frac{\pi \cdot 0,191 \cdot 0,130}{2} = 0,039 \text{ m}^2$$

Siendo L la longitud de la parte en voladizo y D el diámetro de dicha parte.

Para terminar, si calculamos el valor de la presión en cada extremo del eje, será:

$$Presión = \frac{Peso \cdot g}{Área} = \frac{12,5e3 \cdot 9,81}{0,039} = 3,1442 \text{ MPa}$$

El valor de la presión se introducirá en la ventana *Edit Load*, en el apartado *Magnitude* como se puede ver en la siguiente figura.

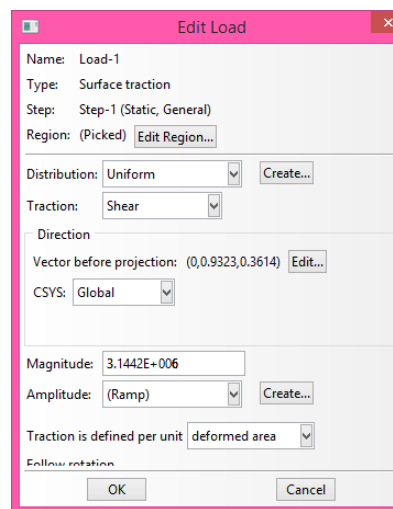


Figura 48. Definición de la presión

Finalmente el modelo del eje con la presión completamente definida quedaría de la siguiente manera:

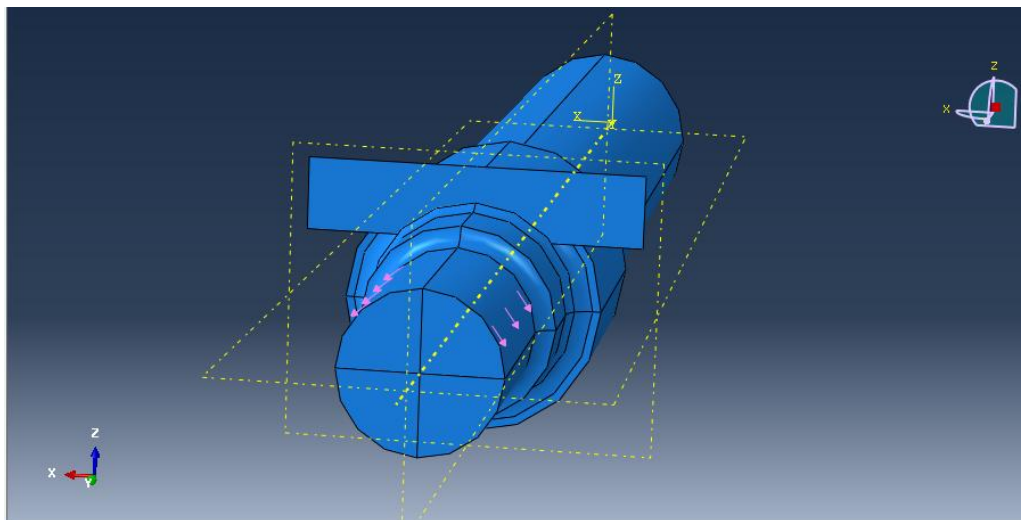


Figura 49. Eje ferroviario con la presión aplicada

#### 4.8. Definir restricciones

Para la definición de las restricciones que aparecen en el diseño, se debe ir al módulo de Creación de fuerzas y condiciones de contorno, y seleccionar la opción *Create Boundary Condition*, aparecerá una ventana donde se deben seleccionar las siguientes opciones:

- *Category > Mechanical*
- *Types for Selected Step > Symmetry/antisymmetry/Encastre*

Después de definir la superficie sobre la que vamos a restringir los movimientos, habrá que seleccionar la opción que nos convenga en la ventana *Edit Boundary Condition*, que en nuestro caso sería *Pinned*, con la que impedimos el movimiento de la zona en los tres ejes principales (X, Y, Z) pero no el giro de esta.

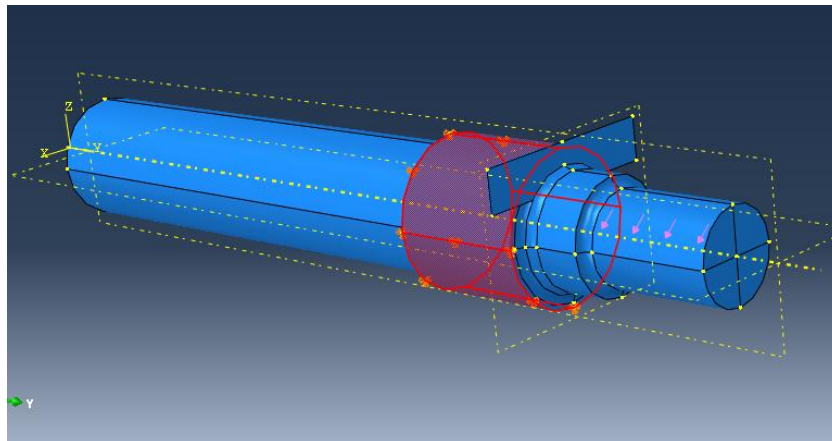


Figura 50. Eje ferroviario con la superficie restringida remarcada

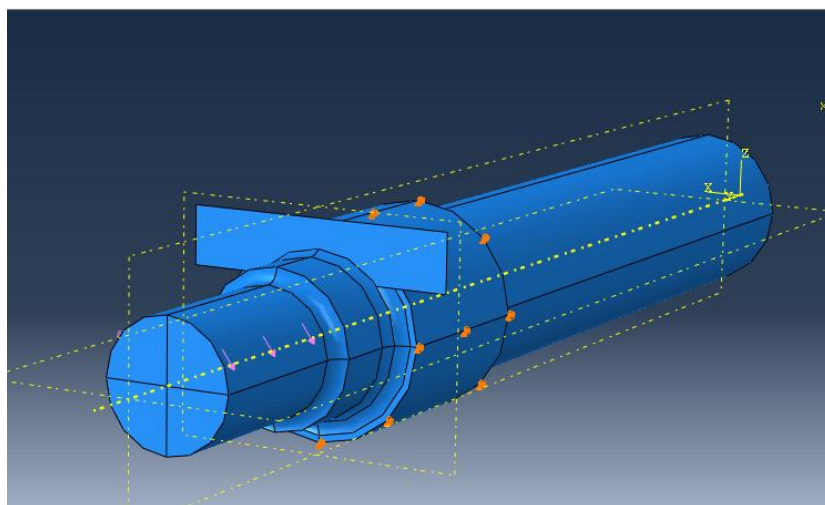


Figura 51. Eje ferroviario con las cargas y las restricciones colocadas

#### 4.9. Definir mallado

Cuando ya se ha definido el modelo por completo, con su geometría, posición en el espacio, cargas colocadas, etc, se pasa a definir la malla que representará al diseño en el estudio del *Método de Elementos Finitos*. Dicha malla es creada por el programa automáticamente, lo único que debe hacer el usuario es definir la parte que desea mallar, el tipo de elemento con el que desea hacerlo y el tamaño aproximado de cada elemento de la malla.

En nuestro caso, se va a trabajar con elementos tetraédricos, ya que favorece el estudio y disminuye el tiempo de este con respecto al mallado con elementos hexaédricos.

Para definir la malla, se debe abrir el módulo de Generación de la malla, *Mesh module*. Una vez aquí, se selecciona la pestaña *Assign Mesh Controls* para cambiar el tipo de elemento. En la ventana emergente se debe elegir la opción *Tet* (Tetraédrico), habiendo seleccionado antes la parte deseada para mallar, en nuestro caso se seleccionará todo el eje con cuidado de no seleccionar la grieta, que se quedará sin mallar.

En la siguiente figura se puede ver la ventana para cambiar el tipo de elemento:

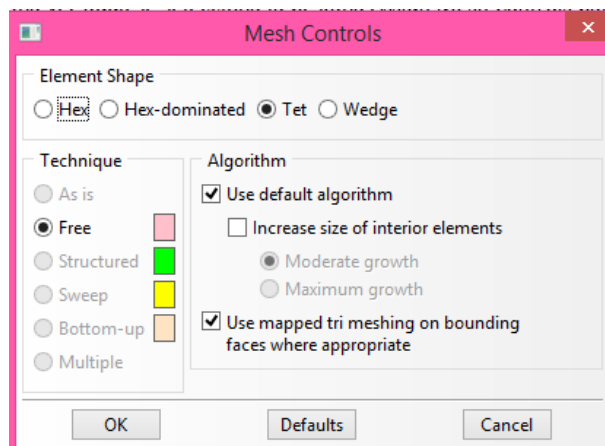


Figura 52. Definición características de la malla

Para definir el tamaño de los elementos se debe ir a la opción *Seed Part Instance*, y en la ventana emergente se introducirá el valor aproximado del tamaño global de los elementos.

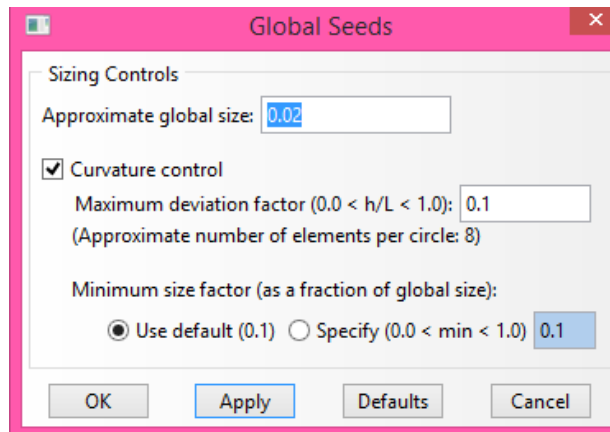


Figura 53. Definición del tamaño aproximado del elemento

En los apartados siguientes se realizará un estudio para definir el tamaño adecuado de los elementos, que nos garantice fiabilidad en el estudio.

Para terminar de mallar el eje, se debe acudir a la opción *Mesh Part Instance* y seleccionando todo el eje, sin la grieta, el programa pasará a calcular la malla más adecuada en función del tipo de elemento elegido y en función del tamaño introducido. El aspecto del eje con su correspondiente malla se puede observar en la siguiente figura:

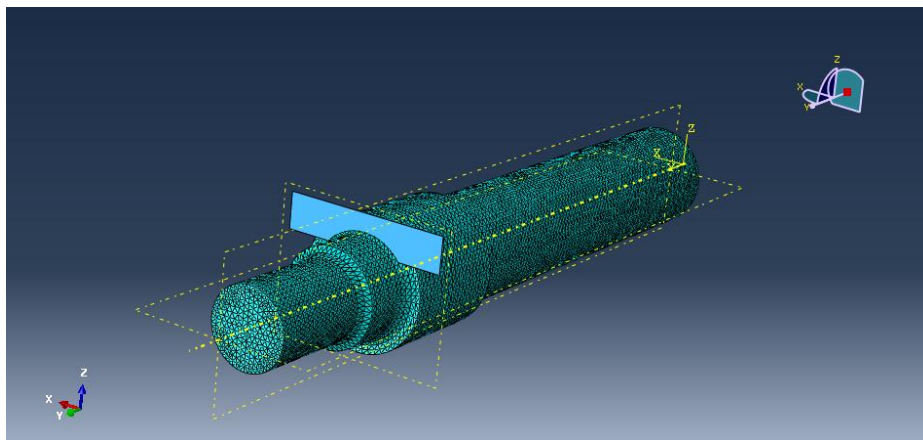


Figura 54. Eje ferroviario mallado

#### 4.10. Definir trabajo (job)

Para la correcta monitorización del problema se va a trabajar en el *Job module*, una vez aquí, se elige la opción *Create Job* que nos permitirá crear un nuevo estudio de trabajo con las condiciones que se precisen, en este caso se va a realizar el estudio con las condiciones que vienen por defecto, por lo que un vez creado el nuevo trabajo, simplemente se selecciona la opción *Job Manager*, en la que darán comienzo los cálculos haciendo *click* en Submit.

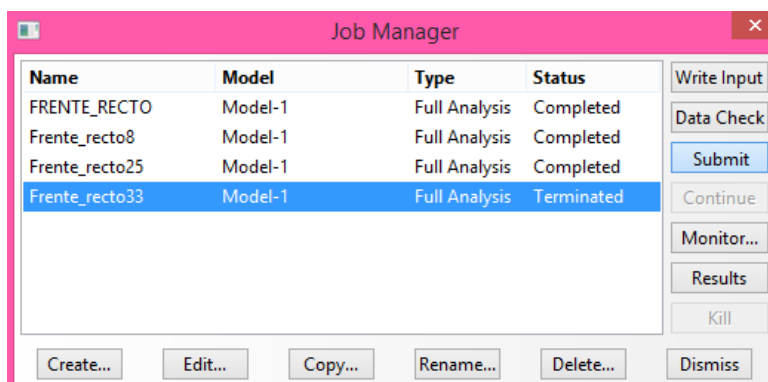


Figura 55. Iniciación del estudio





# **CAPÍTULO V**

## **RESULTADOS**

- 5.1. Estudio de convergencia
- 5.2. Estudio de las tensiones en el eje fracturado
- 5.3. Cálculo del FIT en el eje fracturado



### 5.1. Estudio de convergencia

Este estudio se va a realizar para analizar la convergencia de los resultados, ya que estos varían en función de la malla seleccionada. El estudio se realiza únicamente sobre el eje, sin tener en cuenta la grieta. Los pasos para generar el estudio del eje son los explicados en el capítulo 4, obviando los apartados donde aparezca la grieta.

Se van a estudiar los valores de las tensiones que soporta el eje cuando se le aplica una presión en sus extremos en voladizo, en concreto la tensión de Von Mises.

Se espera que los valores converjan según se vaya variando la malla, y esto nos permita obtener las características óptimas de la malla para nuestro estudio, consiguiendo así disminuir los tiempos de cálculo computacional.

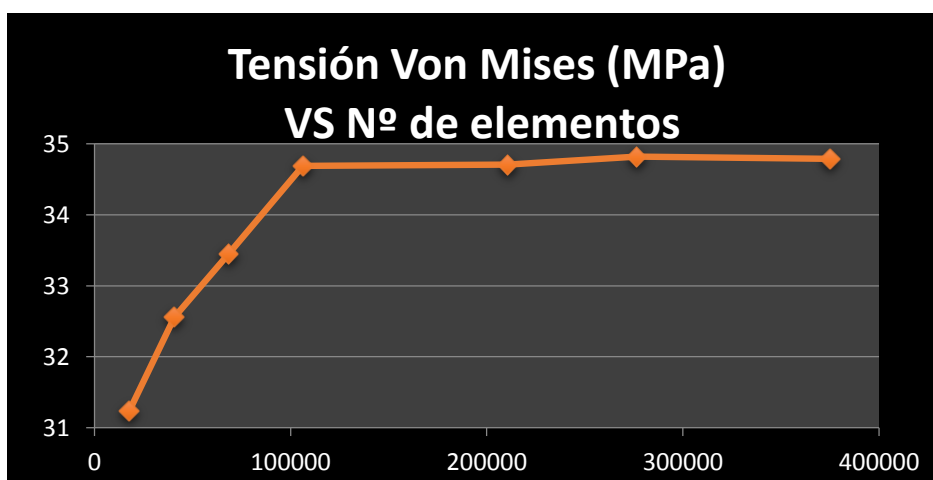
La definición de la malla es un paso muy importante debido a la gran cantidad de estudios que se van a realizar, por lo tanto, cada instante de tiempo que se consiga disminuir por estudio, permitirá ganar mucho tiempo a lo largo del desarrollo del trabajo.

En los estudios, se va variar el tamaño de los elementos, consiguiendo de esta manera variar el número de nodos y de elementos que componen el mallado.

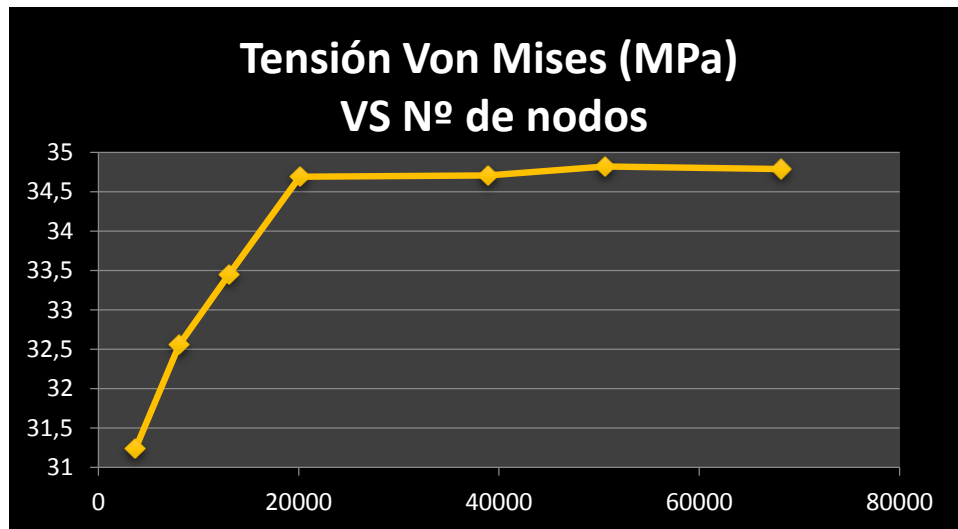
En la siguiente tabla se muestran los tamaños globales de los elementos, el número de nodos, el número de elementos y la tensión de Von Mises que soporta en función de cada tipo de mallado.

Tamaño aproximado del elemento (m)	Número de nodos	Número de elementos	Tensión de VM (Mpa)
0,025	3709	17762	31,24
0,018	8082	40722	32,56
0,015	13054	68342	33,45
0,0125	20106	106210	34,69
0,01	38897	210627	34,71
0,009	50601	276491	34,82
0,008	68185	375249	34,79

Figura 56. Tabla de las tensiones de Von Mises en función de la malla



Gráfica 1. Tensión Von Mises (MPa) en función del número de elementos



Gráfica 2. Tensión Von Mises (MPa) en función del número de nodos

Según se aprecia en las gráficas, el valor de la tensión converge en torno a los 34,7 MPa. Dicho valor es alcanzado cuando el tamaño aproximado del elemento es 0,0125 m.

Para asegurarnos que los valores que calcula el programa se asemejan lo más posible a la realidad se van a realizar todos los estudios con un tamaño aproximado del elemento de 0,01 m, ya que se ha comprobado que con dicho tamaño los valores de tensión no varían prácticamente.

De esta manera todos los estudios se realizarán bajo las mismas condiciones de cálculo, teniendo aproximadamente 40.000 nodos y 200.000 elementos por estudio.

## 5.2. Estudio de las tensiones en el eje fracturado

En este trabajo se han realizado multitud de estudios que varían en función de la posición de la grieta y de la profundidad de ésta, como ya se ha explicado anteriormente.

En concreto se han estudiado siete posiciones diferentes a lo largo del giro del eje, en concreto, cuando la grieta está completamente abierta, es decir, cuando está situado en el punto inicial del giro, lo que denominamos como ángulo 0, y cuando la grieta está cerrada, es decir, situada a 180 grados. En las posiciones intermedias se han realizado cinco estudios a 30, 60, 90, 120 y 150 grados. Para cada posición de la grieta se han realizado nueve profundidades distintas, que van desde el 8% del radio de la sección en la que se realiza la grieta, hasta el 100% del mismo.

Por lo tanto, se han realizado un total de 63 ensayos que nos permitirán estudiar las tensiones y los valores del FIT a lo largo de un giro del eje en el segundo cambio de sección del mismo.

A continuación se muestra un esquema del eje, señalando la posición de la grieta:

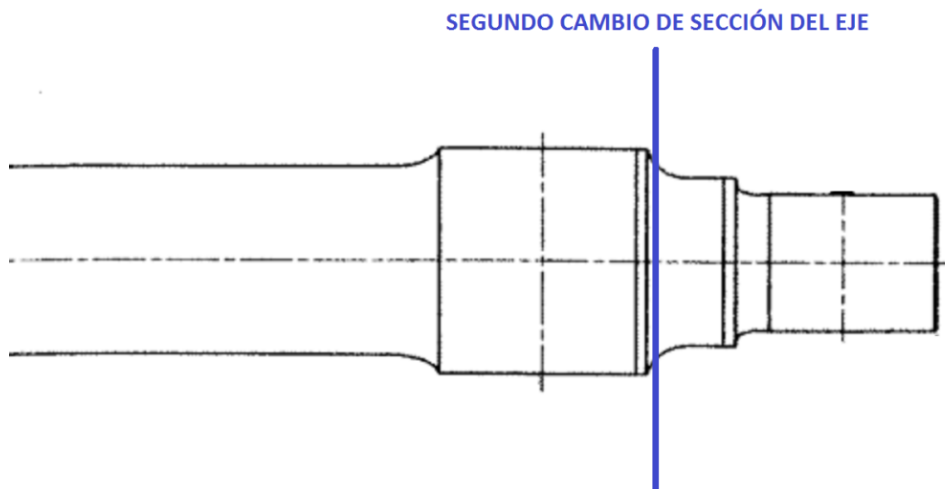


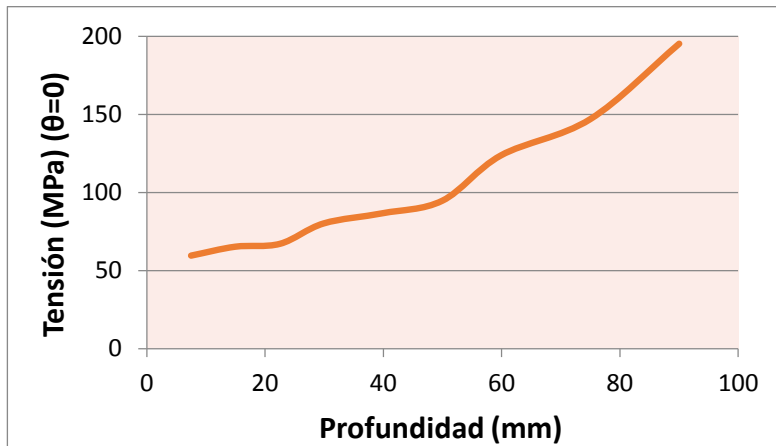
Figura 57. Esquema del eje con la posición de la grieta

En la siguiente tabla se muestran todos los estudios con sus correspondientes valores de tensión de Von Mises en función de la posición angular y de la profundidad de la grieta:

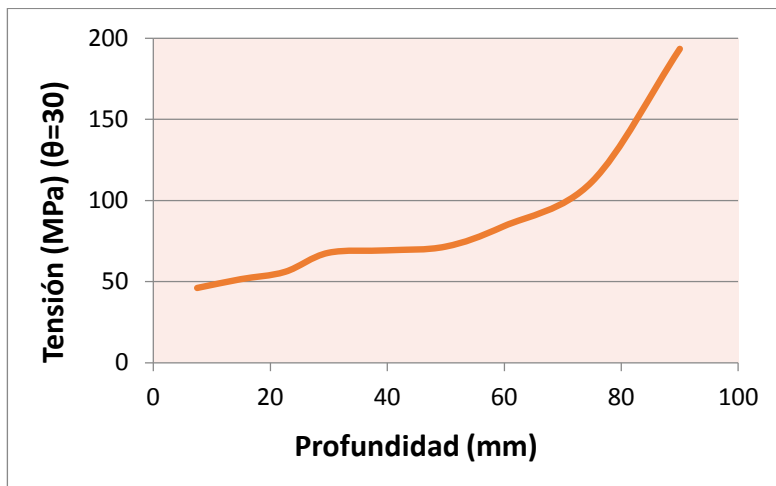
Ángulo VS	0	30	60	90	120	150	180
Profundidad(mm)							
<b>7,47</b>	59,49	46,15	41,56	37,8	45,36	69,15	56,63
<b>14,94</b>	65,2	51,56	52,64	37,96	48,83	76,5	61,67
<b>22,5</b>	67,05	56,08	57,95	38,3	57,94	81,67	63,26
<b>29,88</b>	80,1	67,77	73,78	40,03	66,3	89,6	68,97
<b>39,87</b>	86,64	69,3	83,89	47,38	131,2	89,81	72,45
<b>49,95</b>	94,65	71,6	151,6	60,19	216,4	91,3	78,09
<b>59,85</b>	123,65	84,05	238,6	69,49	335,5	93	99,13
<b>74,97</b>	146,9	111,5	451,3	94,06	618,9	443,5	153,5
<b>90</b>	195,2	193,3	858,5	135,6	1155,9	908	158

Figura 58. Tabla con los valores de la tensión de VM en función del ángulo y de la profundidad de la grieta

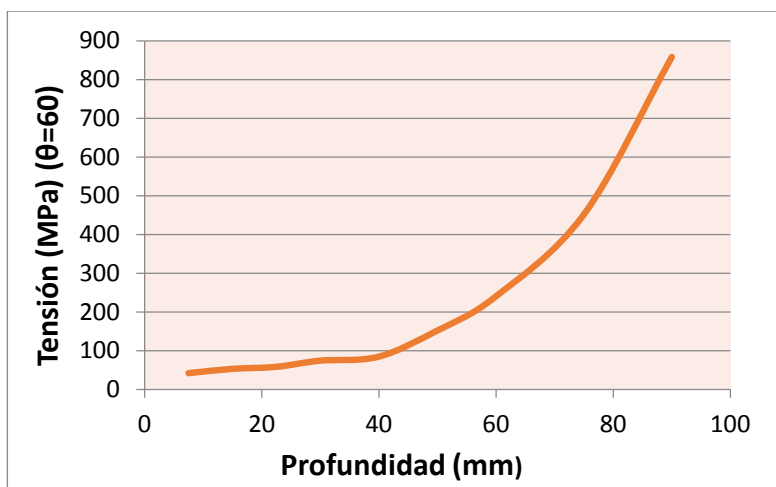
A continuación se muestran las gráficas con los valores de las tensiones de Von Mises (MPa) que soporta el eje en función de la profundidad (mm) de la grieta para cada posición angular ( $\theta$ ):



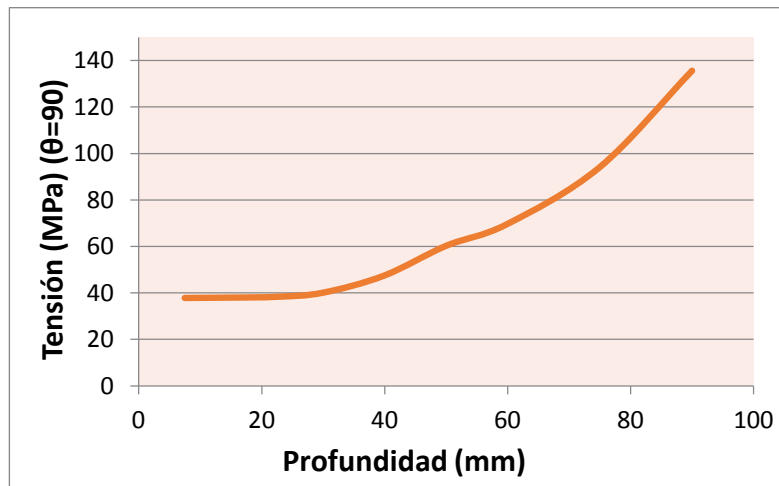
Gráfica 3. Tensión de VM frente a profundidad en la posición angular de 0 grados



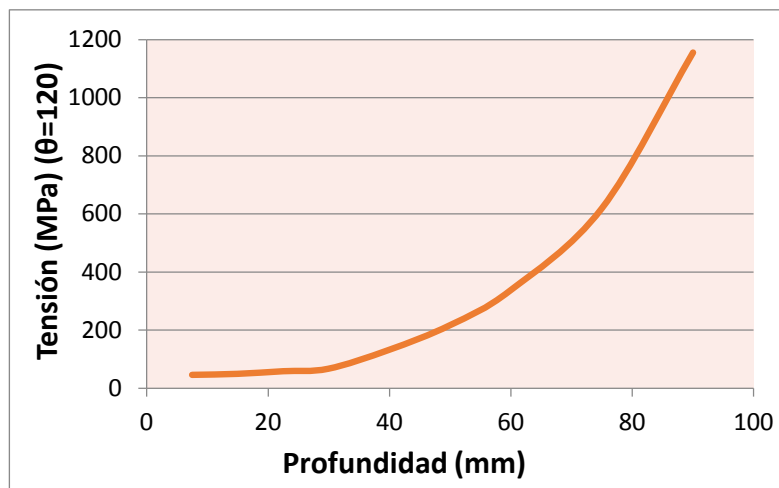
Gráfica 4. Tensión de VM frente a profundidad en la posición angular de 30 grados



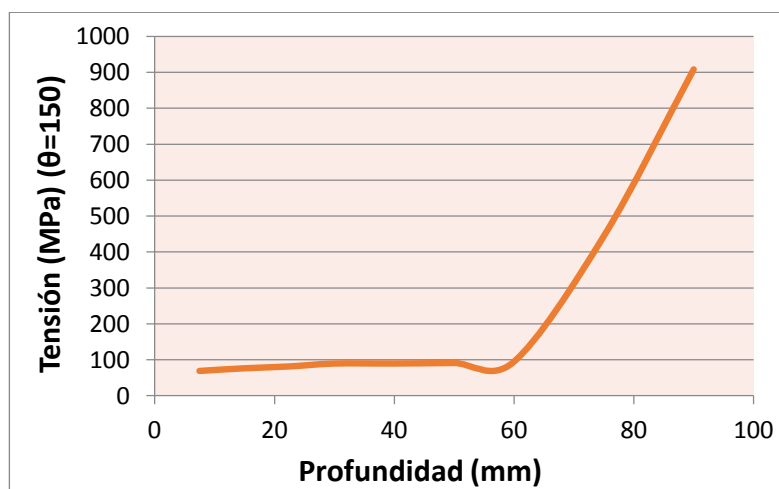
Gráfica 5. Tensión de VM frente a profundidad en la posición angular de 60 grados



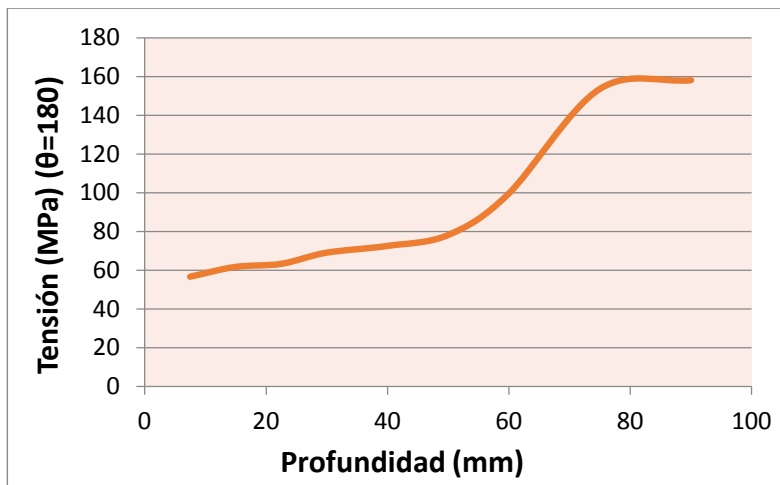
Gráfica 6. Tensión de VM frente a profundidad en la posición angular de 90 grados



Gráfica 7. Tensión de VM frente a profundidad en la posición angular de 120 grados



Gráfica 8. Tensión de VM frente a profundidad en la posición angular de 150 grados



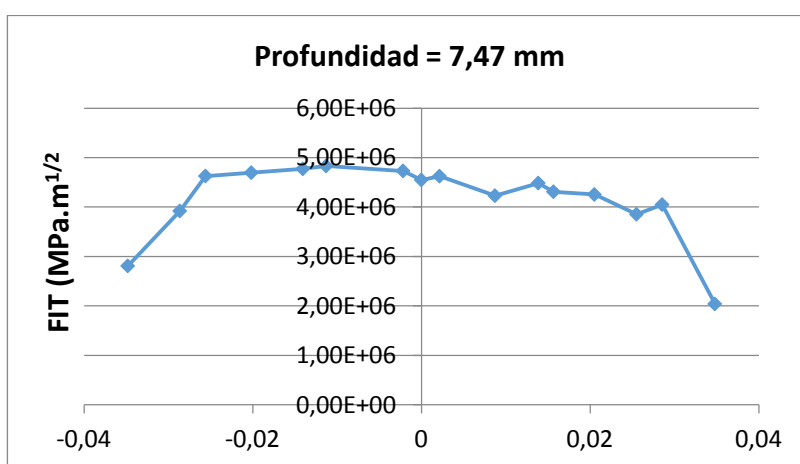
Gráfica 9. Tensión de VM frente a profundidad en la posición angular de 180 grados

### 5.3. Cálculo del FIT en el eje fracturado

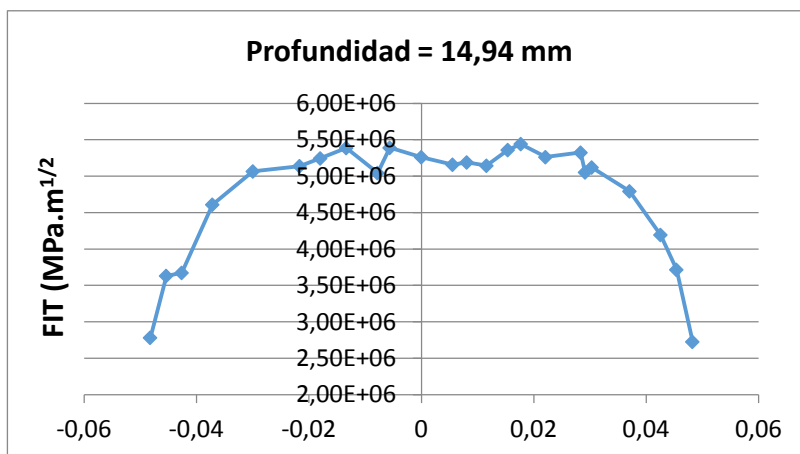
De la misma manera que se ha trabajado para calcular las tensiones que soporta el eje, se van a estudiar los Factores de Intensidad de Tensiones bajo las mismas condiciones.

Por lo tanto se van a obtener los valores de los 63 estudios que se han realizado en *ABAQUS*. Se muestran dichos valores recogidos en gráficas para su fácil visualización.

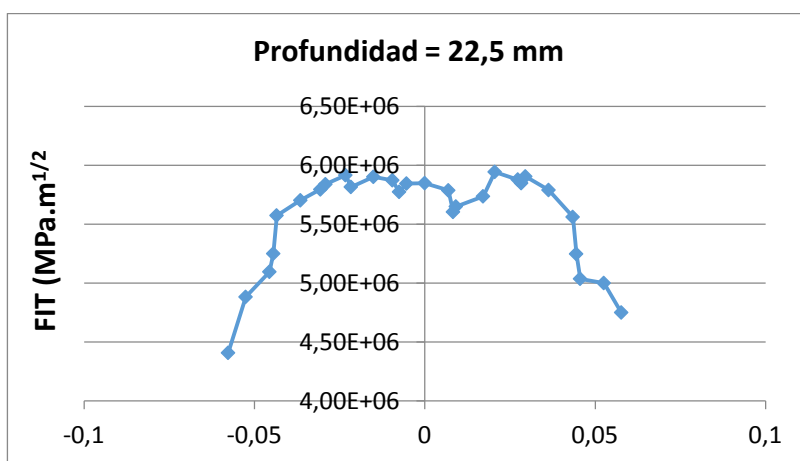
A continuación, aparecen las gráficas referentes a la posición angular de **0 grados**, es decir, cuando la grieta está completamente abierta.



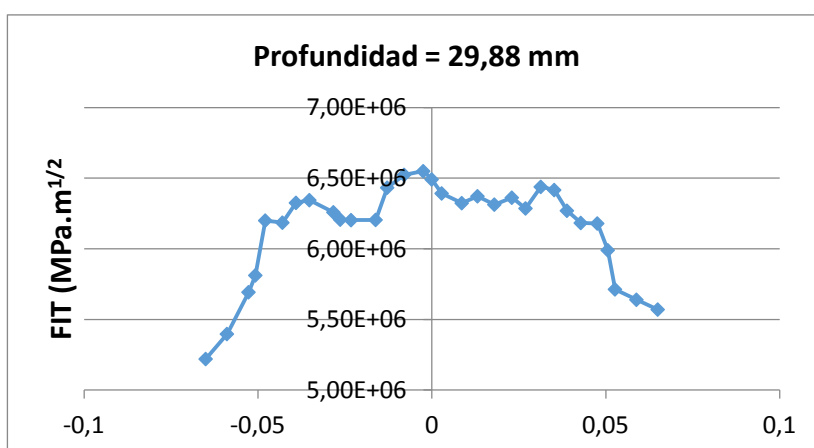
Gráfica 10. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 0 grados



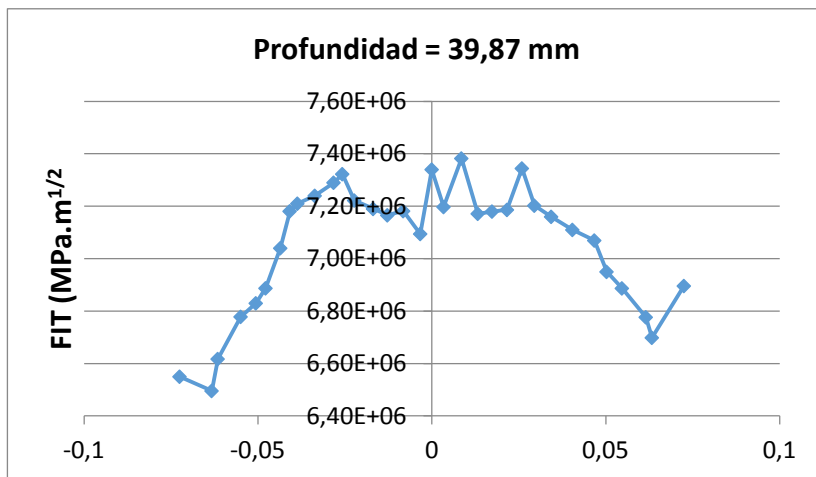
Gráfica 11. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 0 grados



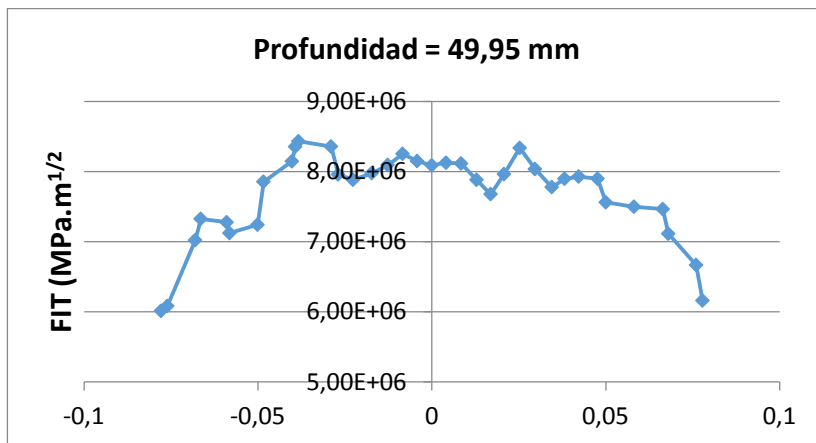
Gráfica 12. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 0 grados



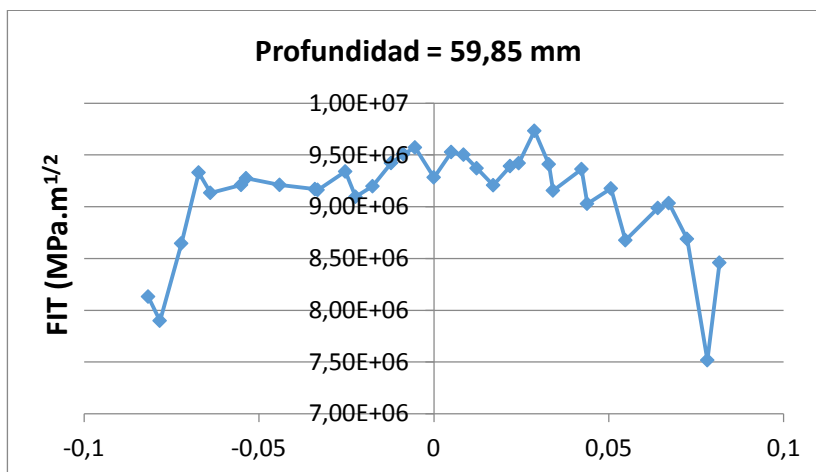
Gráfica 13. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 0 grados



Gráfica 14. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 0 grados

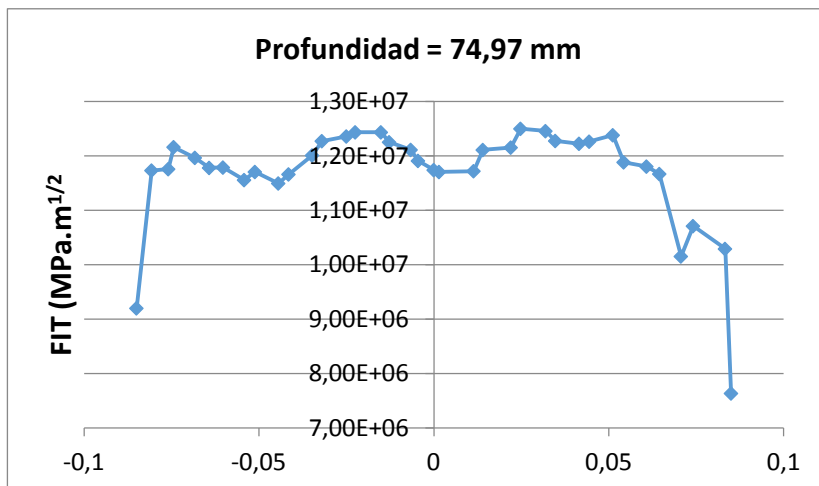


Gráfica 15. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 0 grados

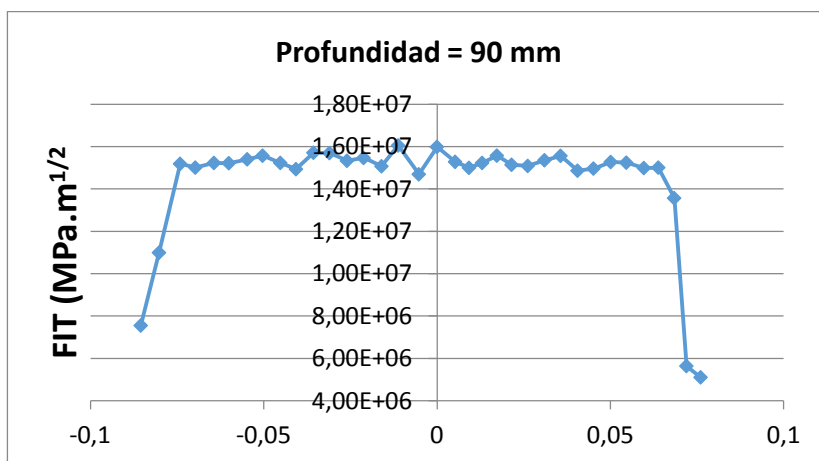


Gráfica 16. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 0 grados



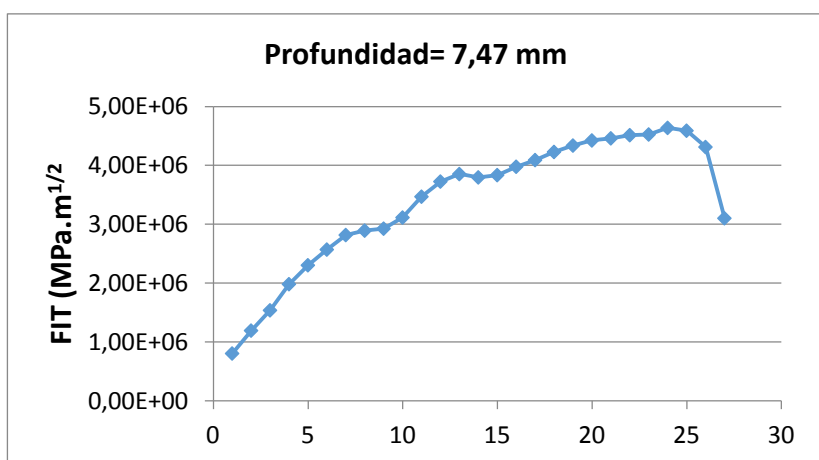


Gráfica 17. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 0 grados

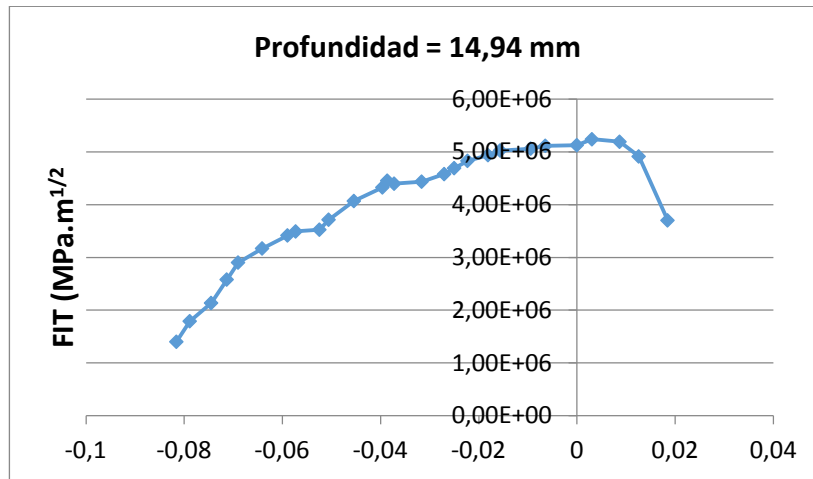


Gráfica 18. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 0 grados

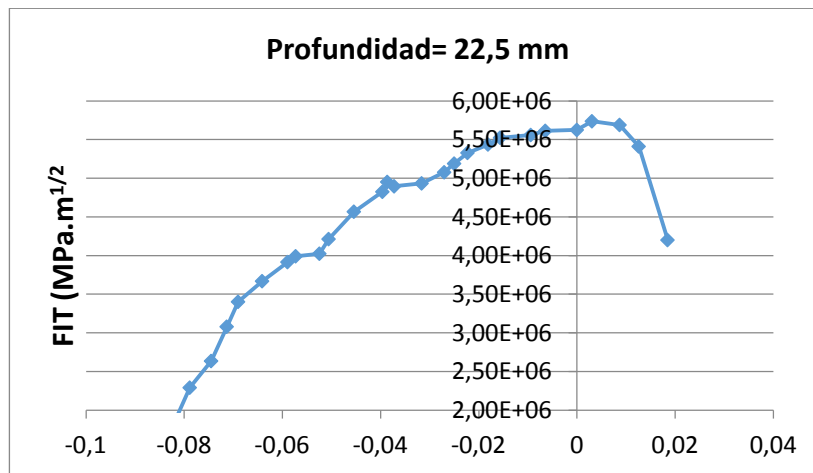
Las siguientes gráficas muestran los valores del Factor de Intensidad de Tensiones en la posición angular de **30 grados**:



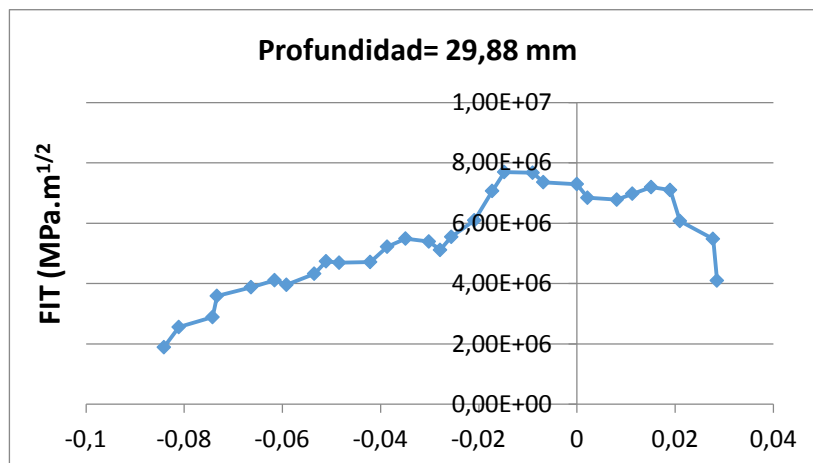
Gráfica 19. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 30 grados



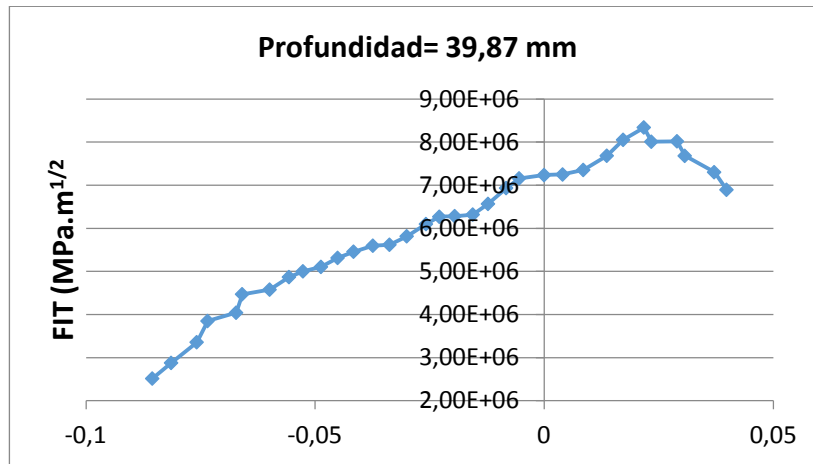
Gráfica 20. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 30 grados



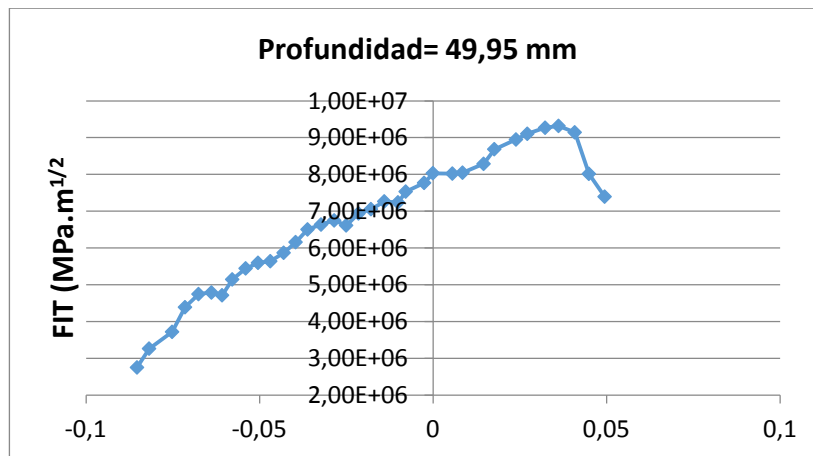
Gráfica 21. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 30 grados



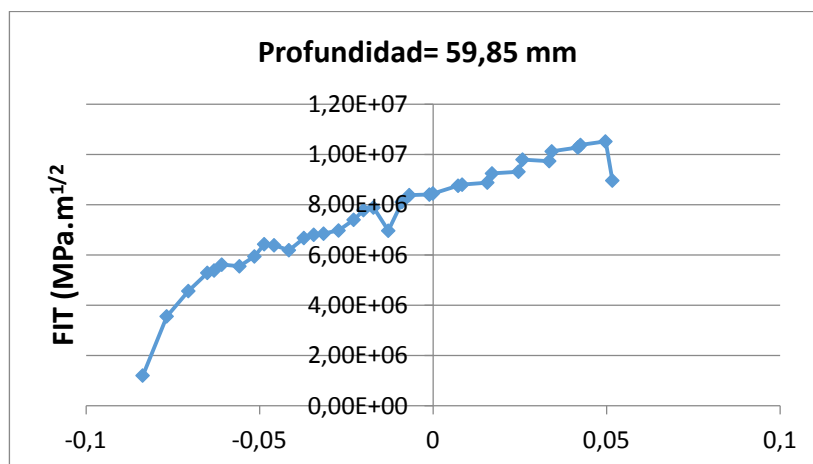
Gráfica 22. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 30 grados



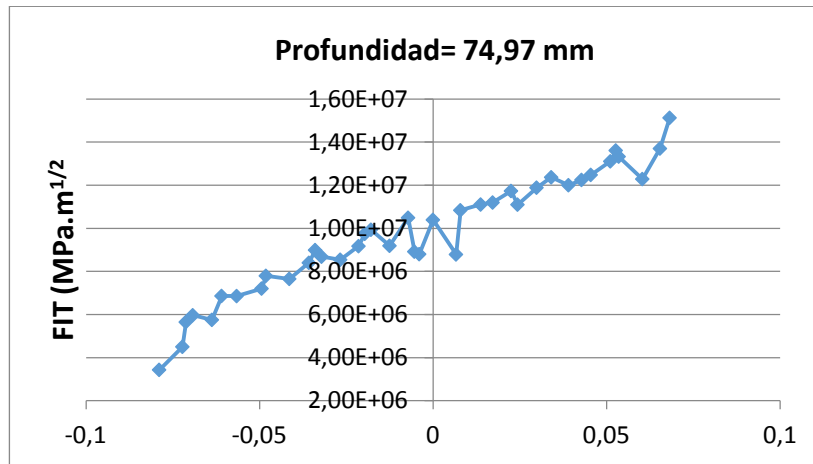
Gráfica 23. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 30 grados



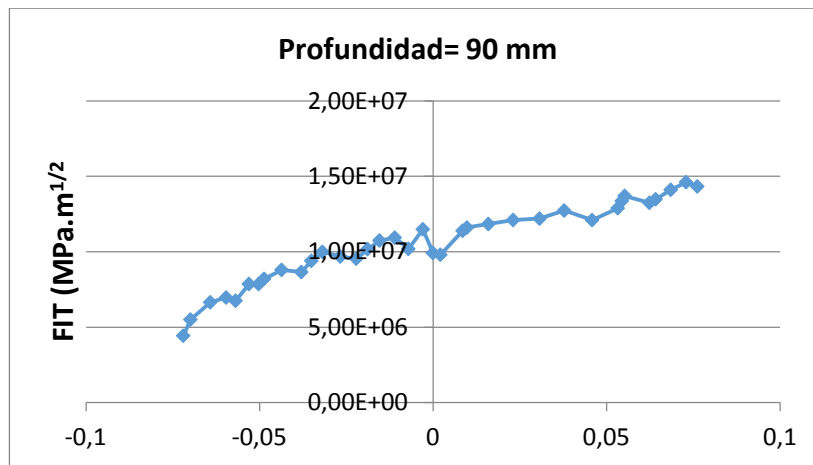
Gráfica 24. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 30 grados



Gráfica 25. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 30 grados

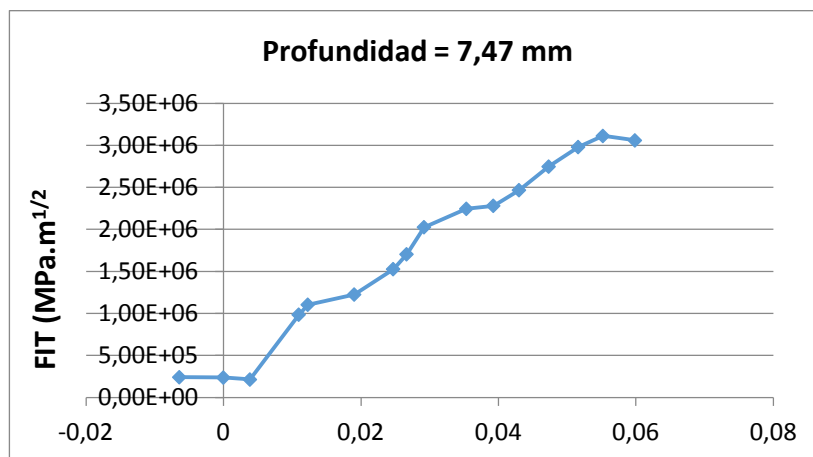


Gráfica 26. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 30 grados

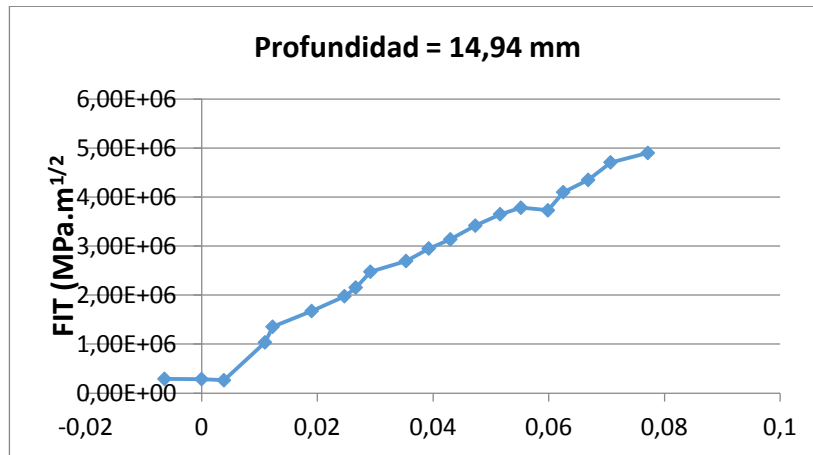


Gráfica 27. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 30 grados

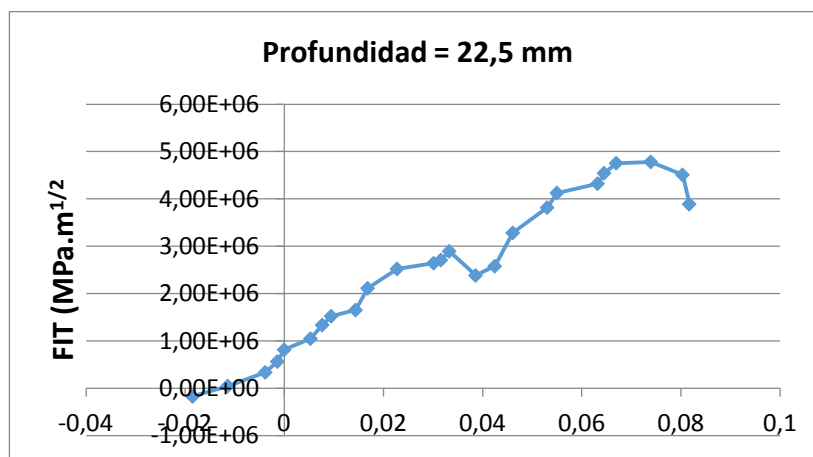
A continuación, se muestran las gráficas en referencia a la posición angular de **60 grados**:



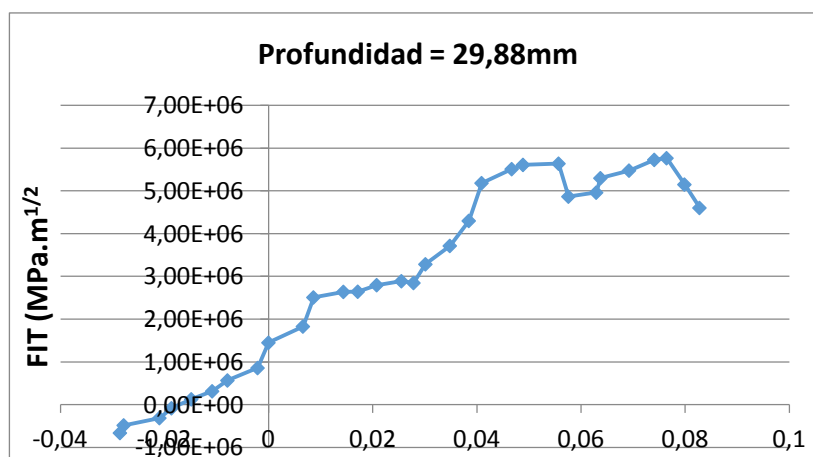
Gráfica 28. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 60 grados



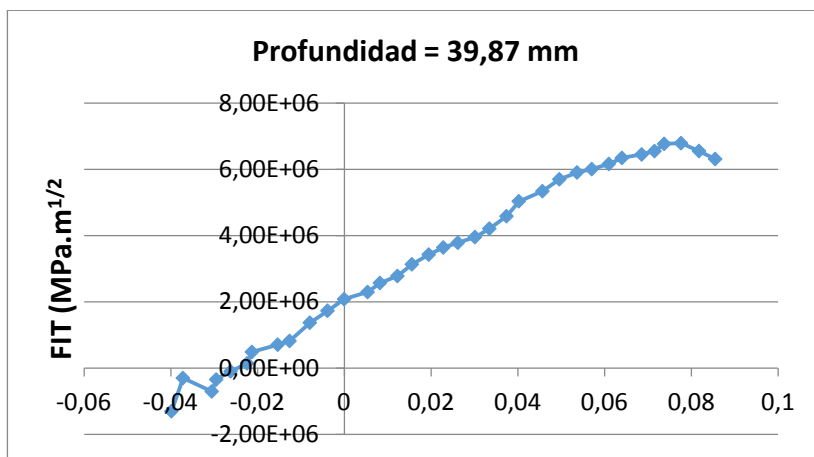
Gráfica 29. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 60 grados



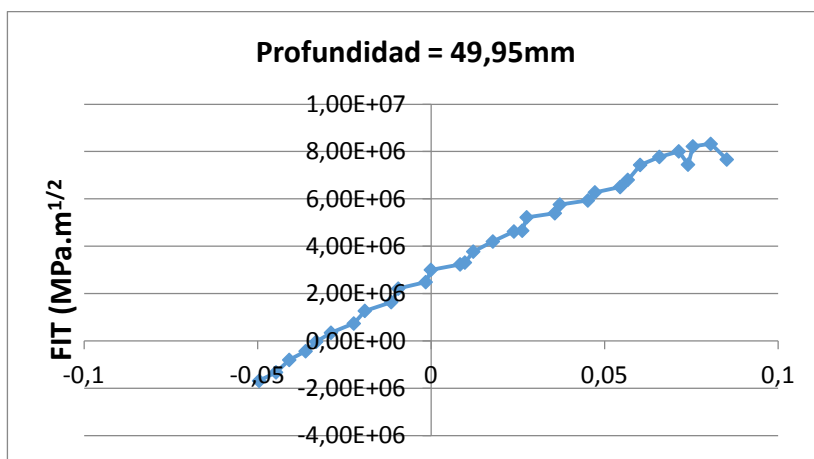
Gráfica 30. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 60 grados



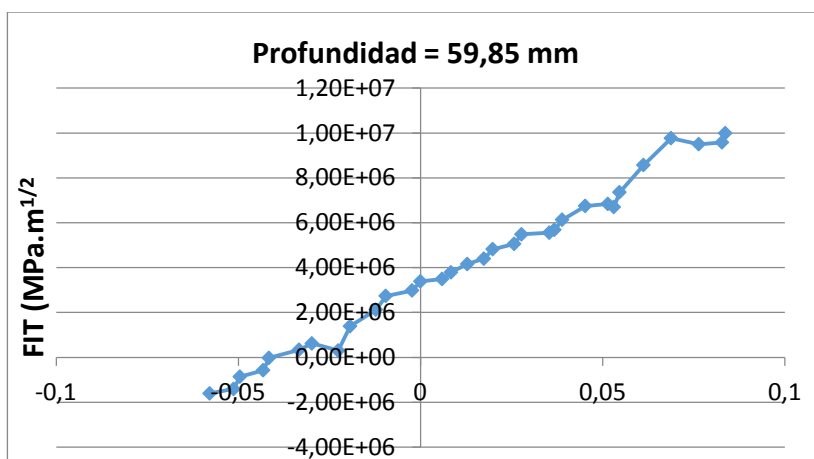
Gráfica 31. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 60 grados



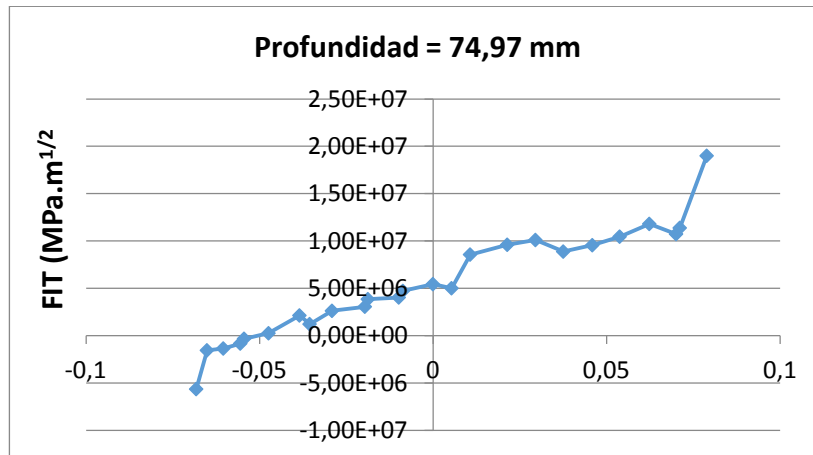
Gráfica 32. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 60 grados



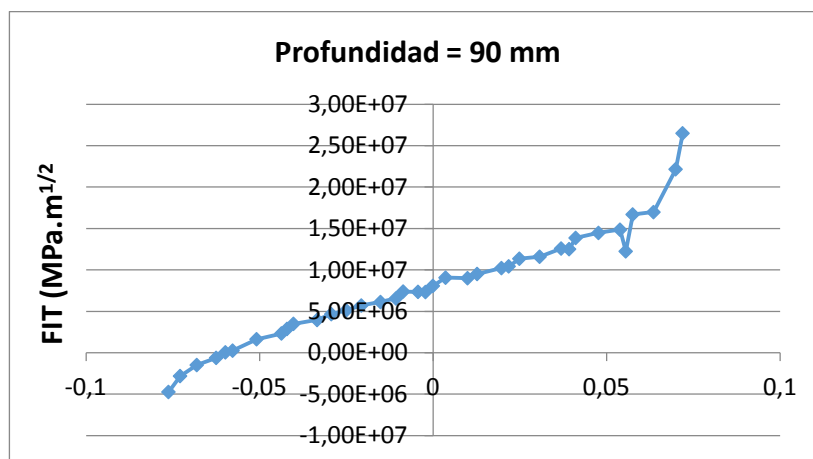
Gráfica 33. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 60 grados



Gráfica 34. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 60 grados

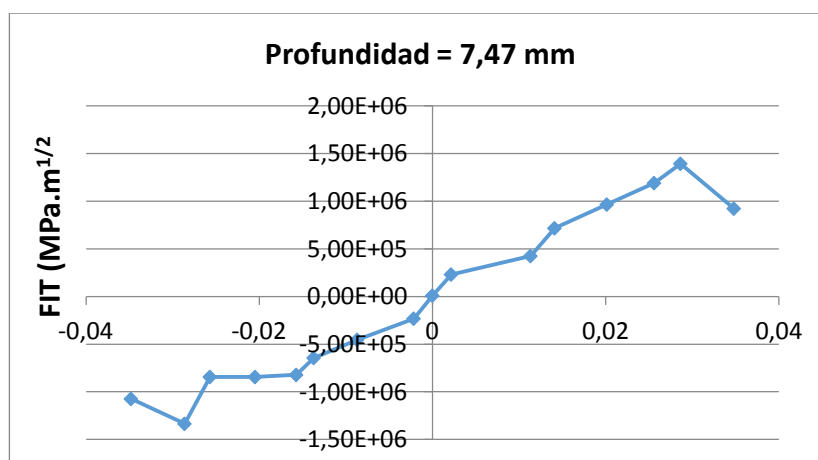


Gráfica 35. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 60 grados

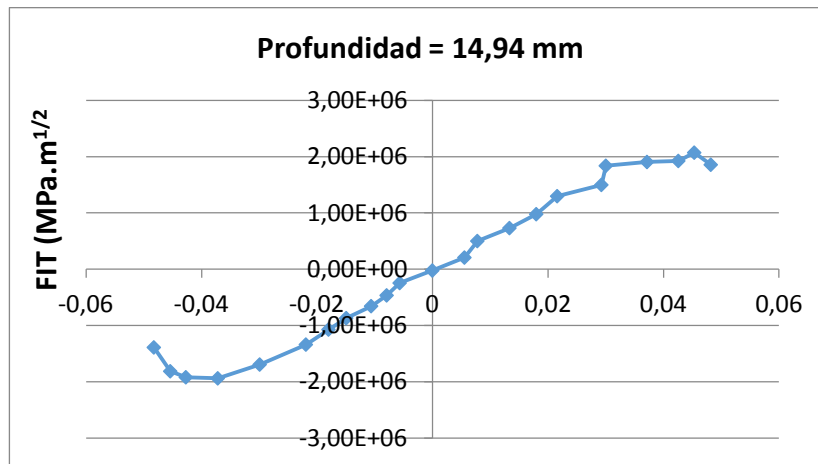


Gráfica 36. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 60 grados

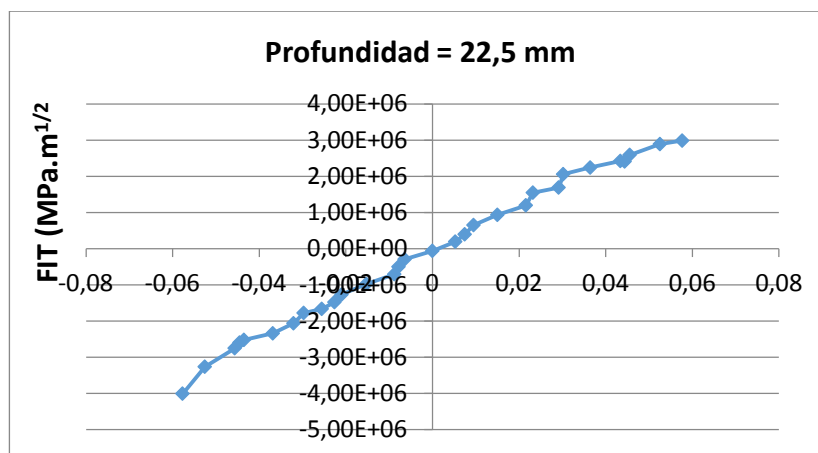
A continuación, se muestran las gráficas referentes a la posición angular de **90 grados**, es decir, cuando la grieta tiene la mitad del frente abierta y la otra cerrada:



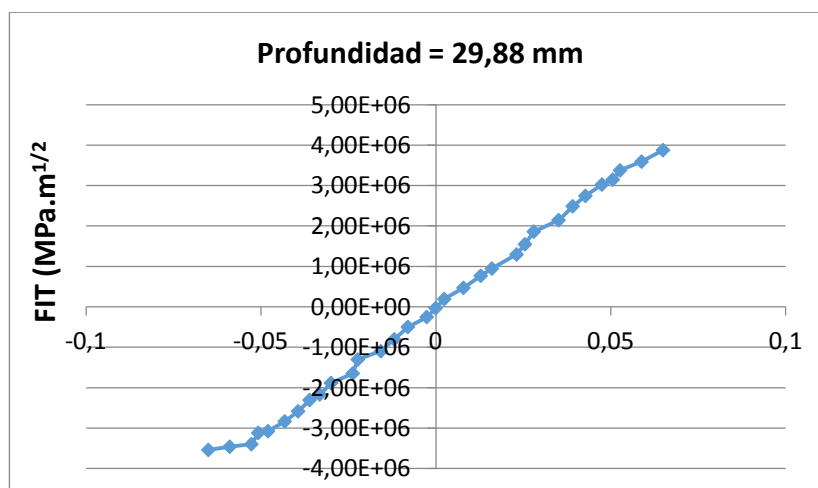
Gráfica 37. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 90 grados



Gráfica 38. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 90 grados

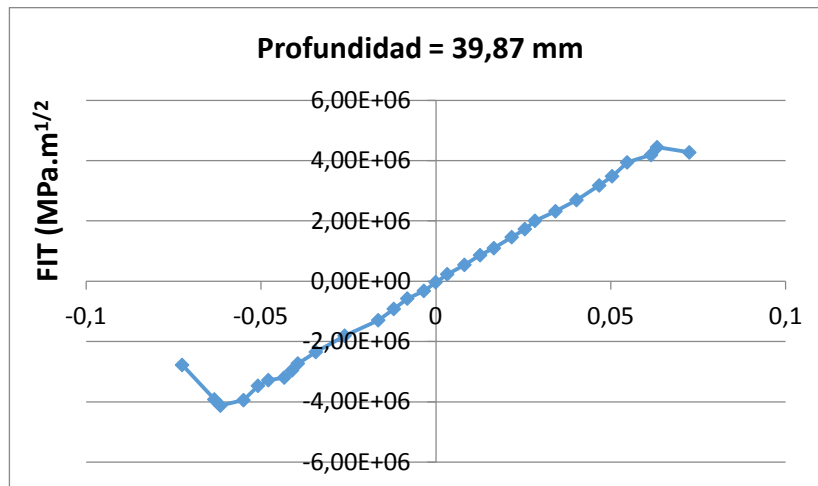


Gráfica 39. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 90 grados

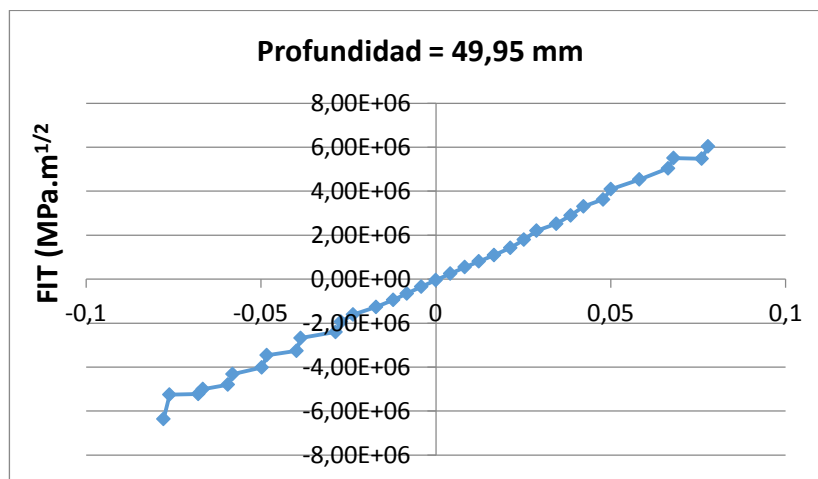


Gráfica 40. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 90 grados

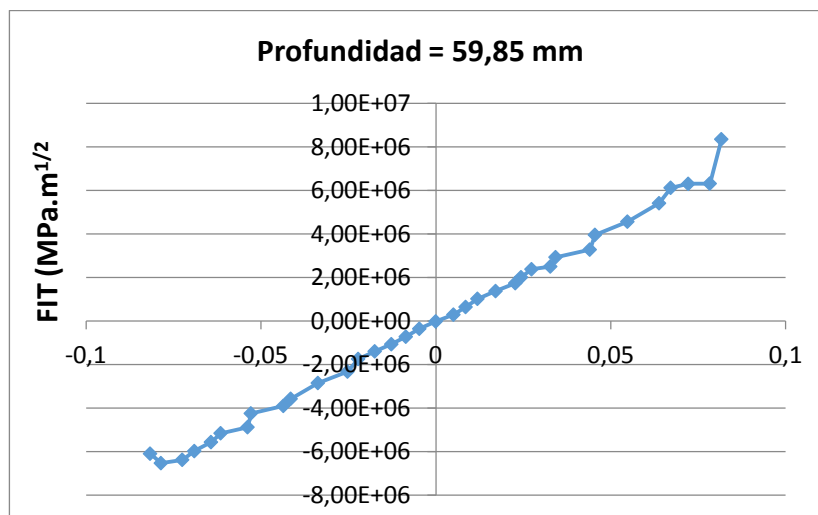




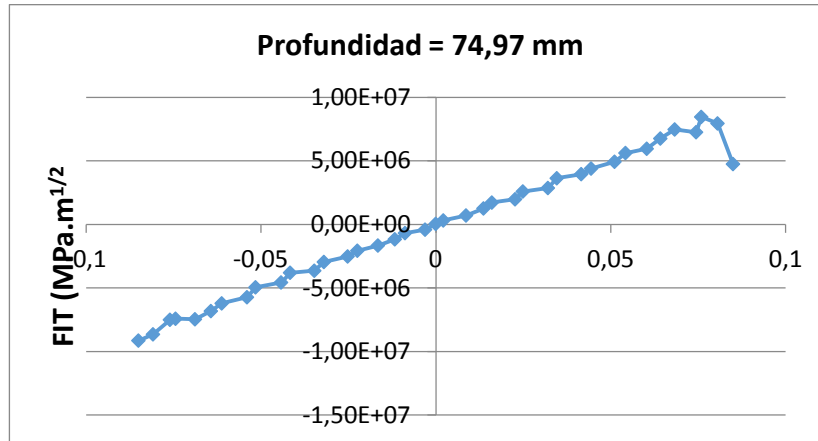
Gráfica 41. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 90 grados



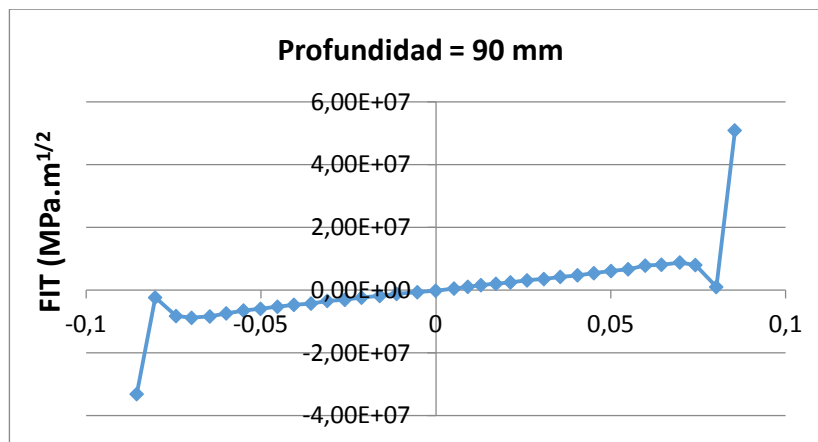
Gráfica 42. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 90 grados



Gráfica 43. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 90 grados

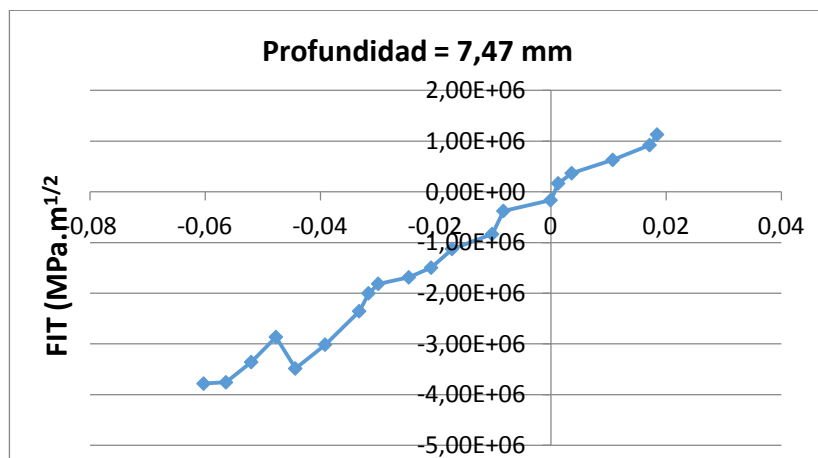


Gráfica 44. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 90 grados

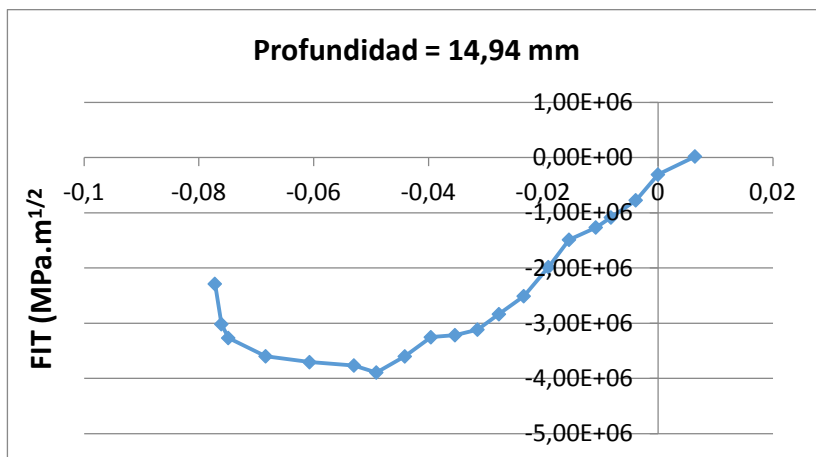


Gráfica 45. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 90 grados

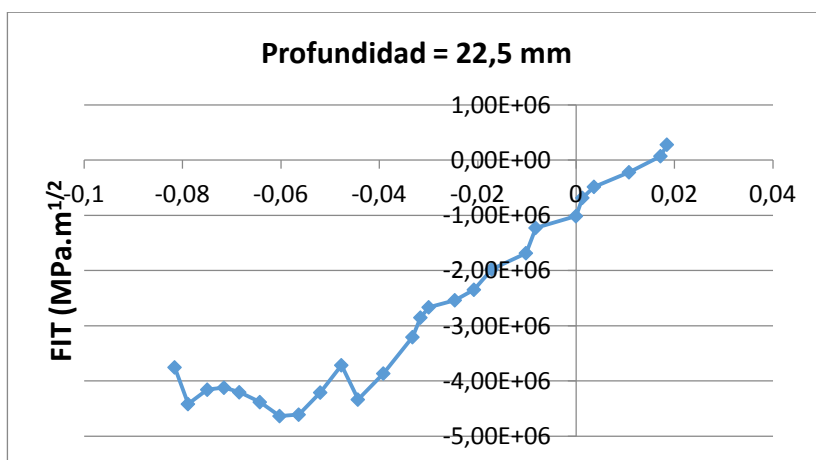
A continuación, se muestran las gráficas en relación a la posición angular de **120 grados**:



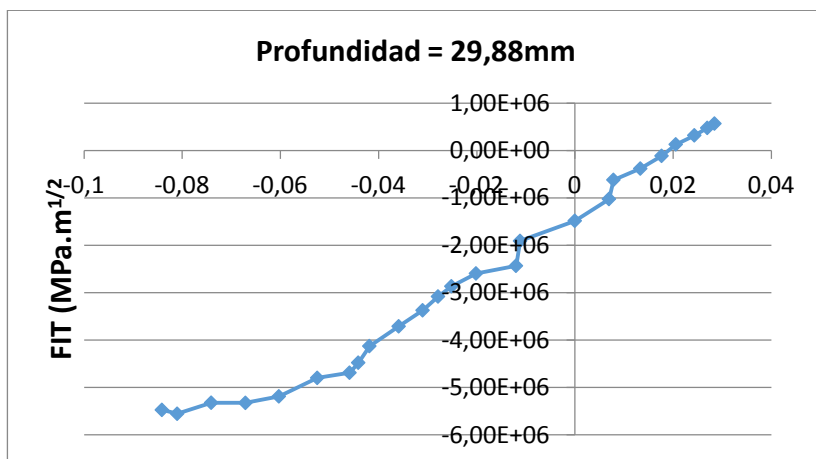
Gráfica 46. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 120 grados



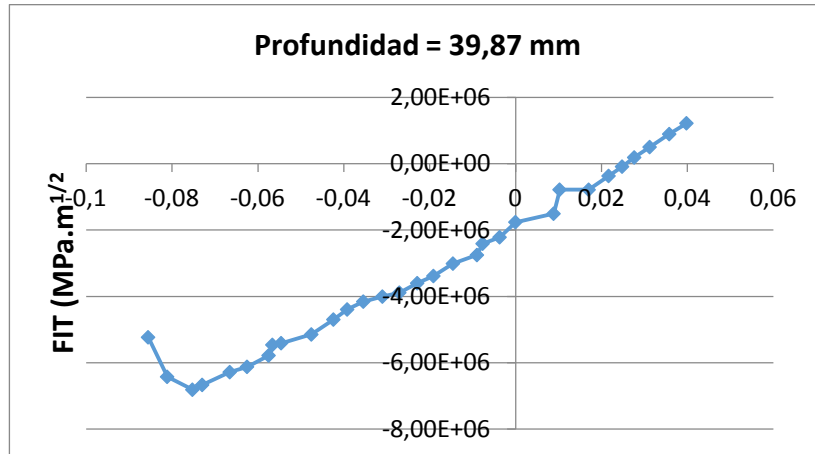
Gráfica 47. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 120 grados



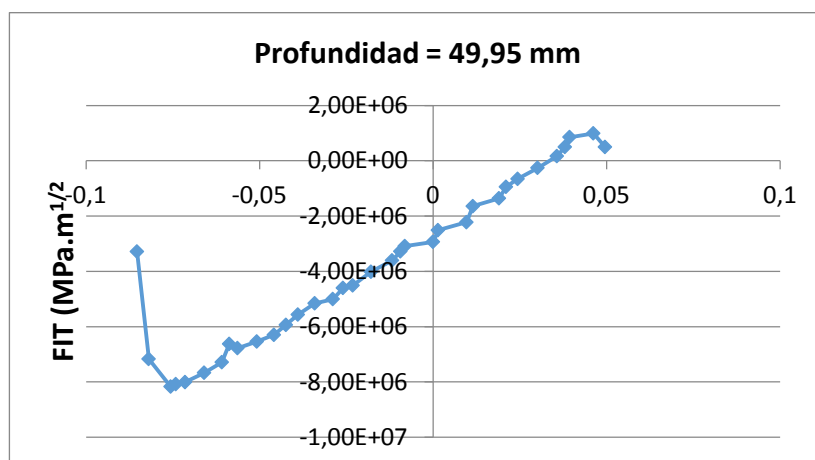
Gráfica 48. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 120 grados



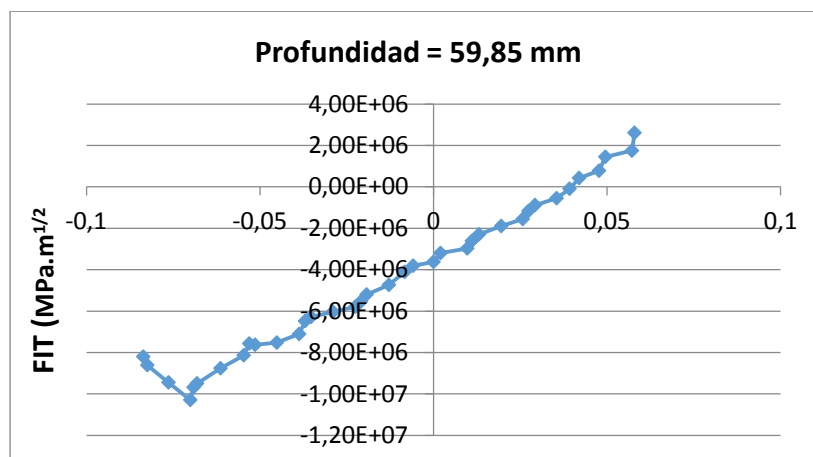
Gráfica 49. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 120 grados



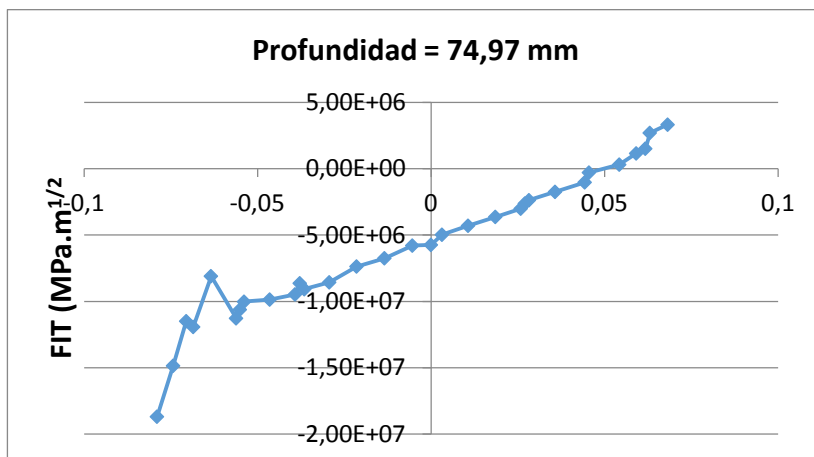
Gráfica 50. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 120 grados



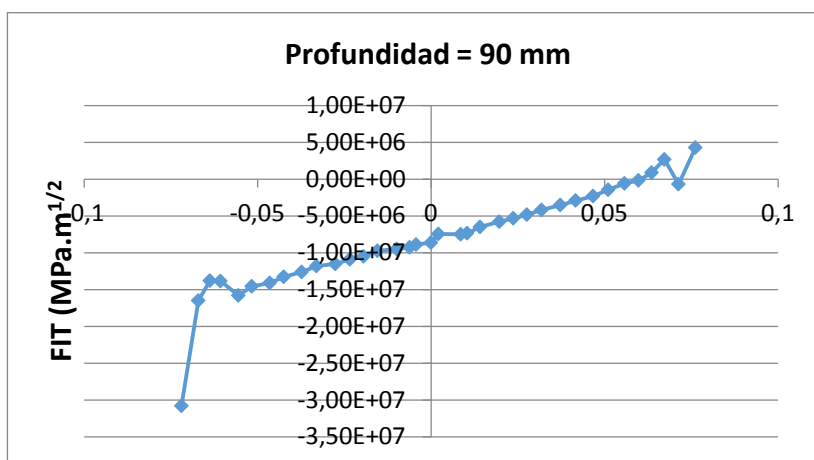
Gráfica 51. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 120 grados



Gráfica 52. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 120 grados

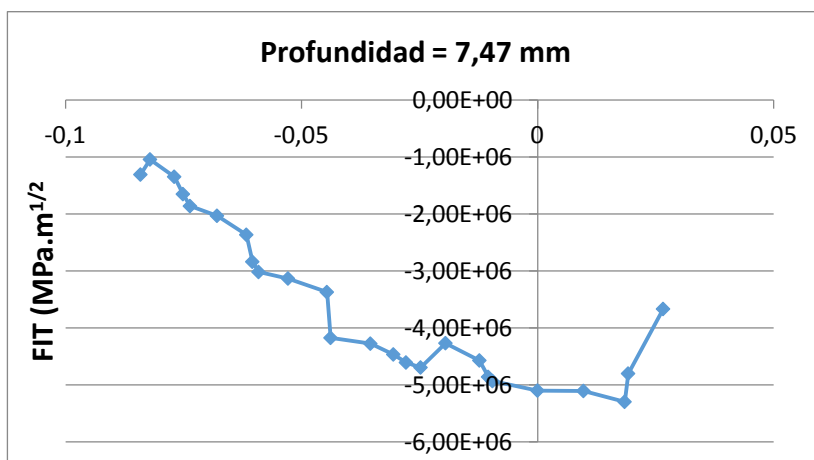


Gráfica 53. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 120 grados

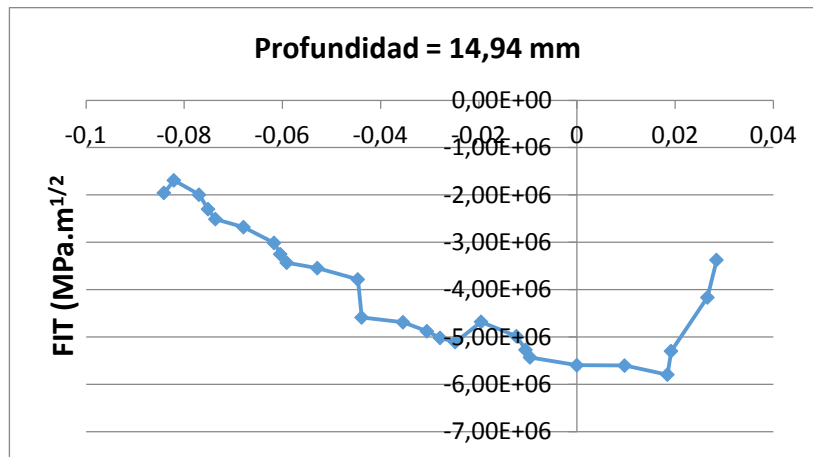


Gráfica 54. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 120 grados

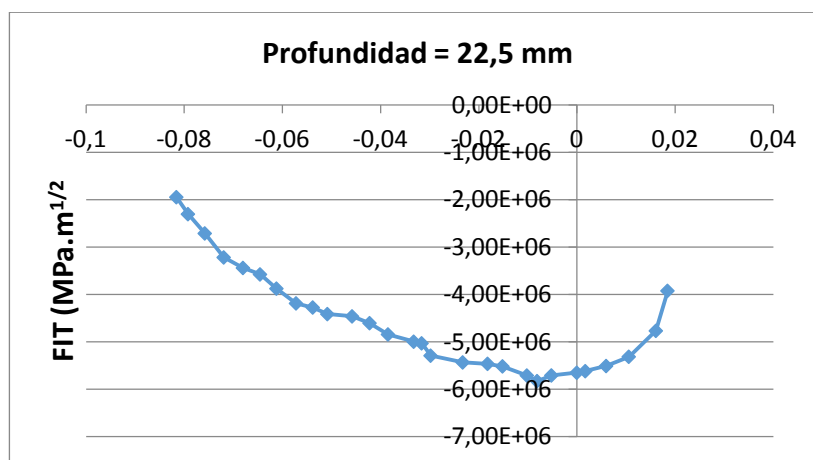
Las siguientes gráficas se centran en la posición angular de **150 grados**:



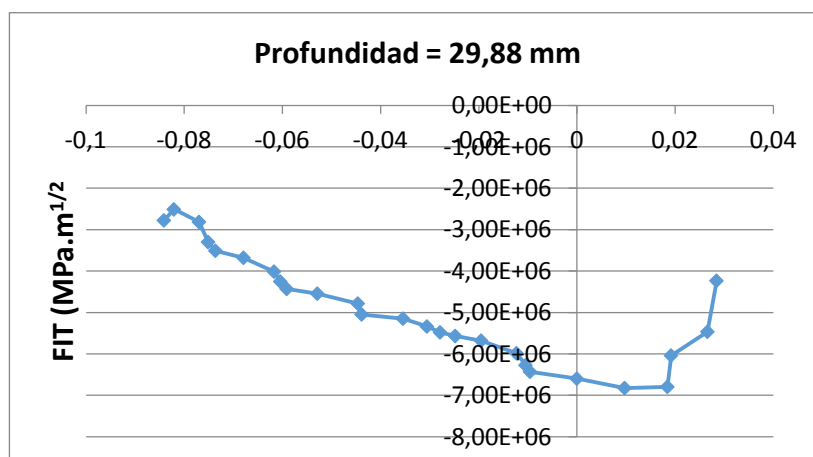
Gráfica 55. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 150 grados



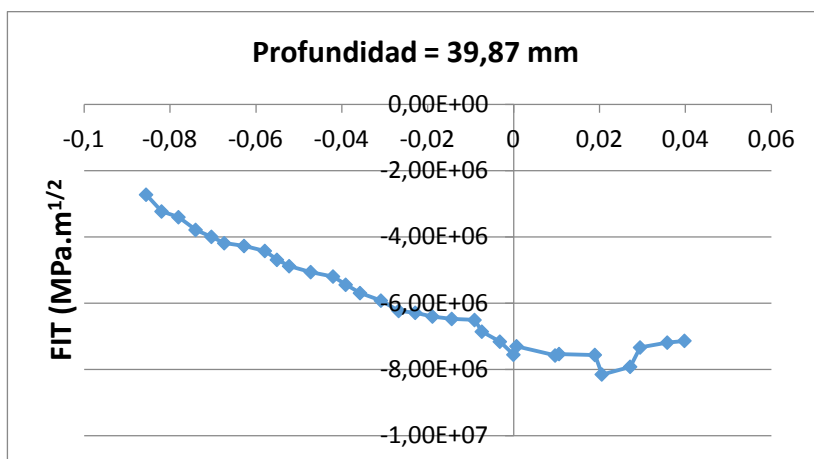
Gráfica 56. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 150 grados



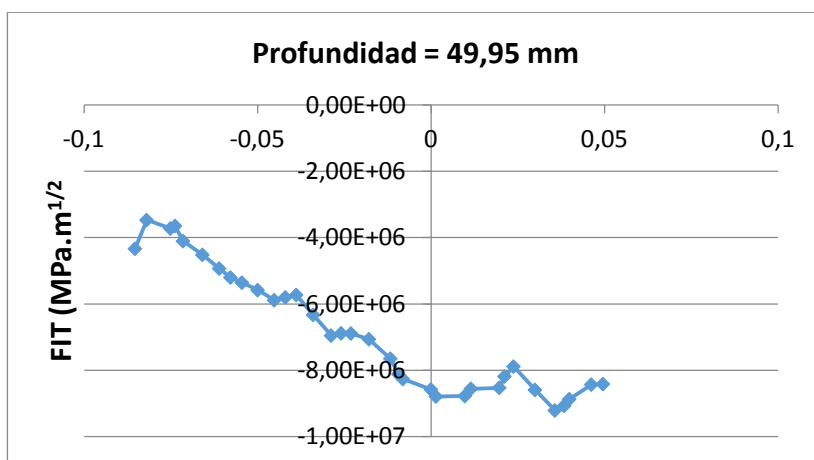
Gráfica 57. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 150 grados



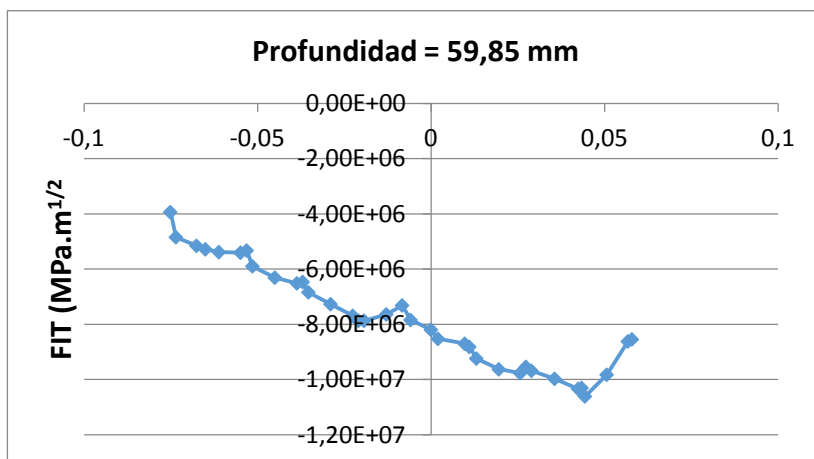
Gráfica 58. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 150 grados



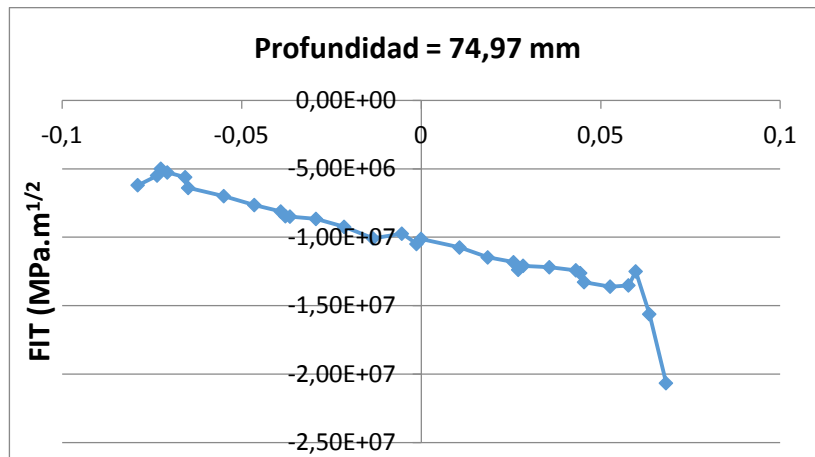
Gráfica 59. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 150 grados



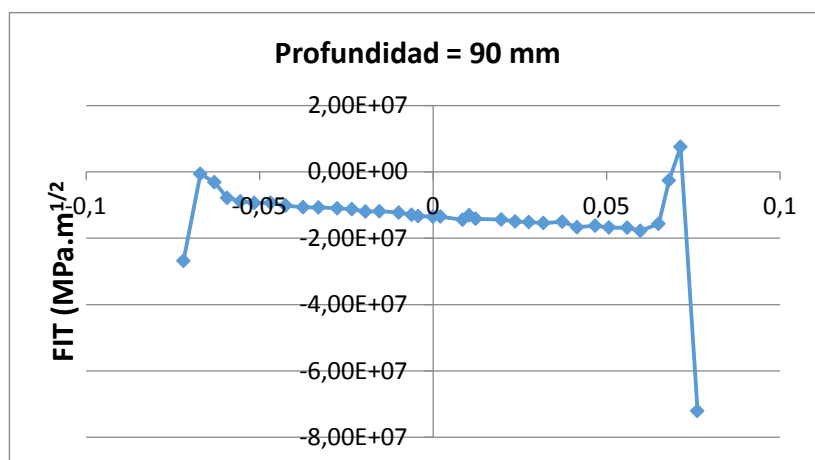
Gráfica 60. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 150 grados



Gráfica 61. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 150 grados

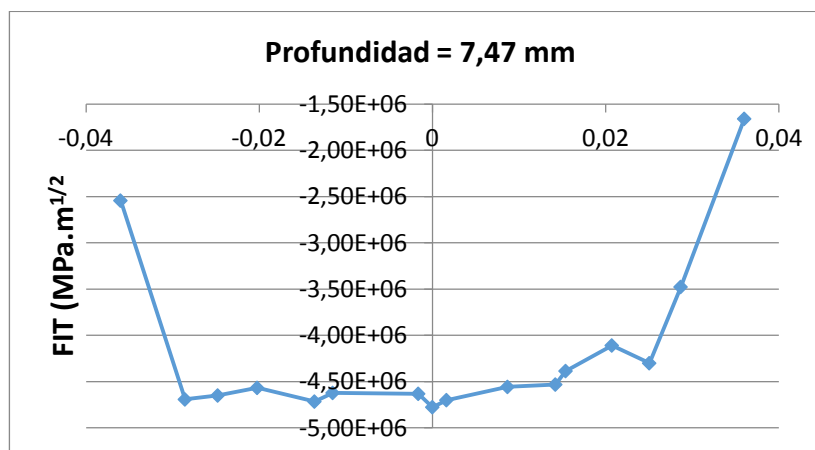


Gráfica 62. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 150 grados



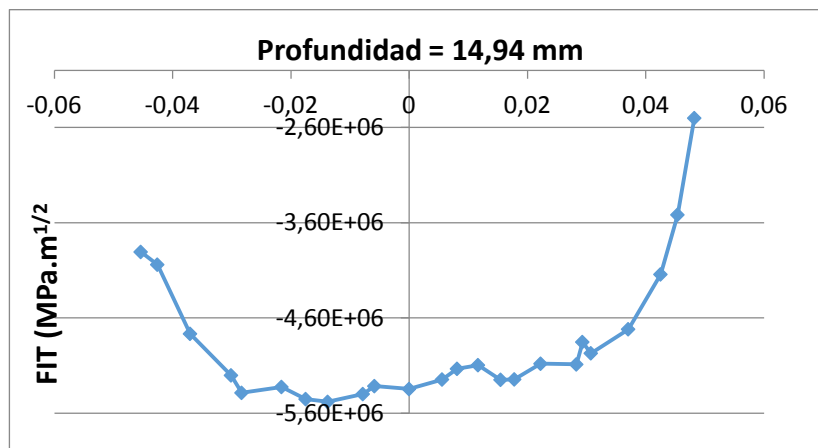
Gráfica 63. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 150 grados

A continuación, se muestran las gráficas en relación a la posición angular de **180 grados**, es decir, cuando la grieta está completamente cerrada.

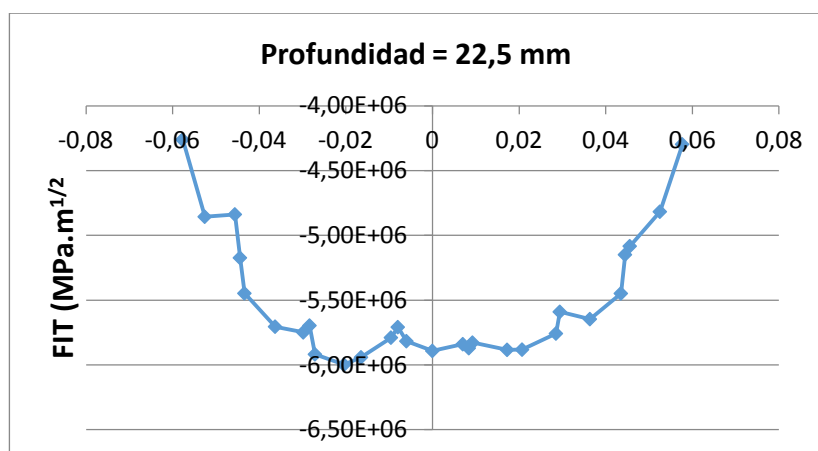


Gráfica 64. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 180 grados

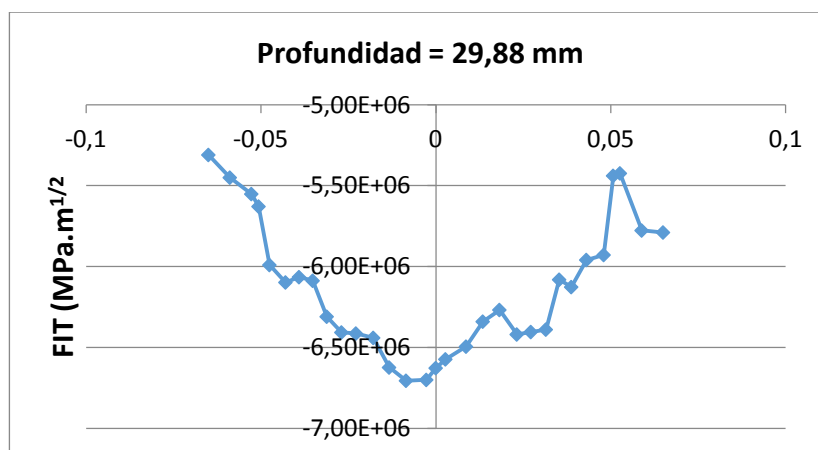




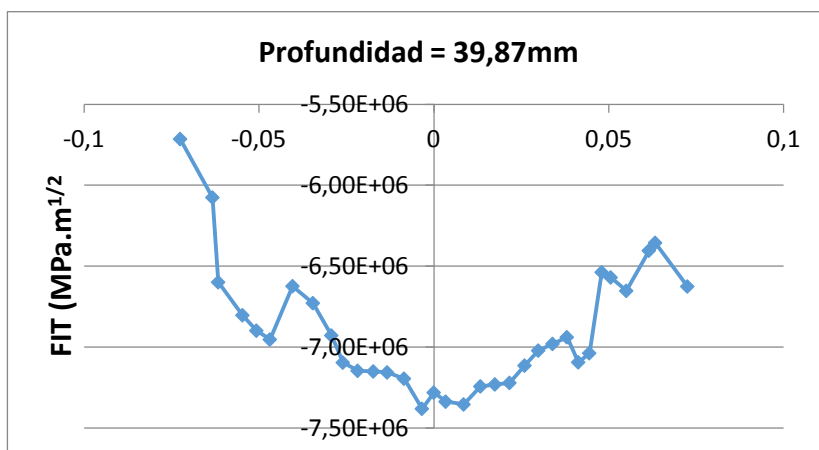
Gráfica 65. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 180 grados



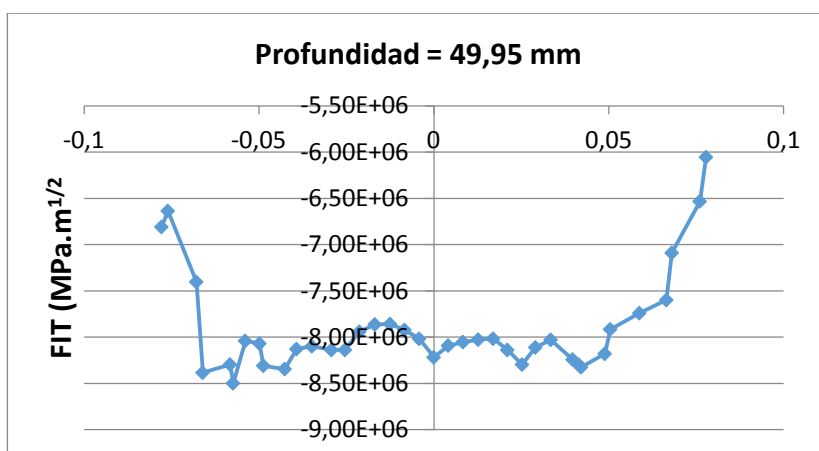
Gráfica 66. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 180 grados



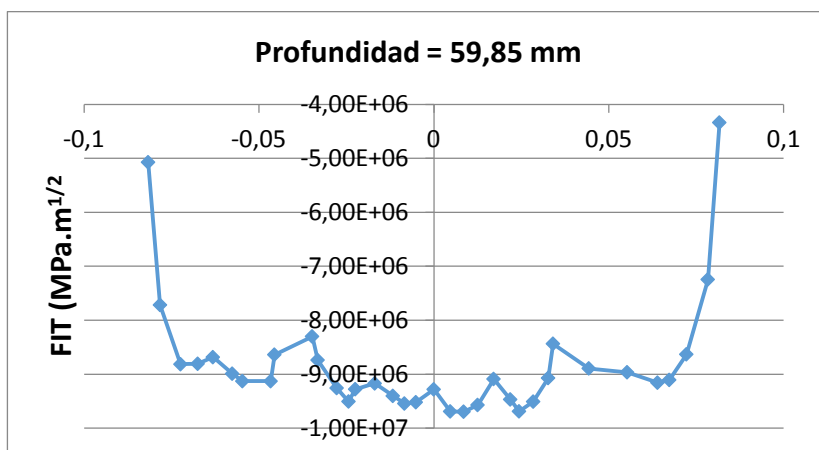
Gráfica 67. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 180 grados



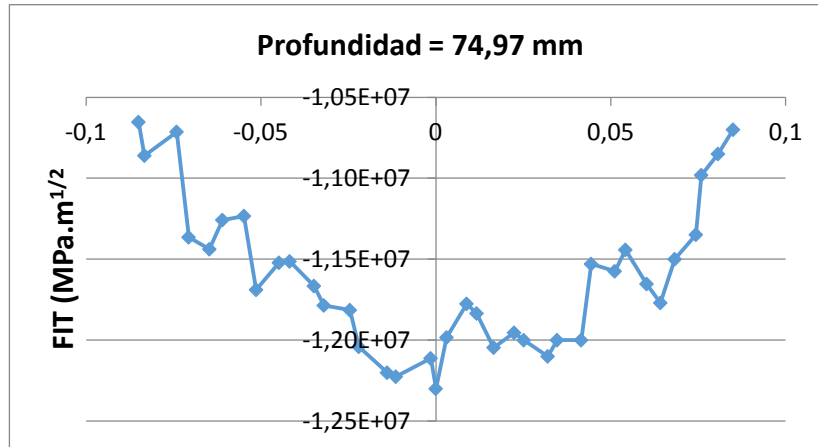
Gráfica 68. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 180 grados



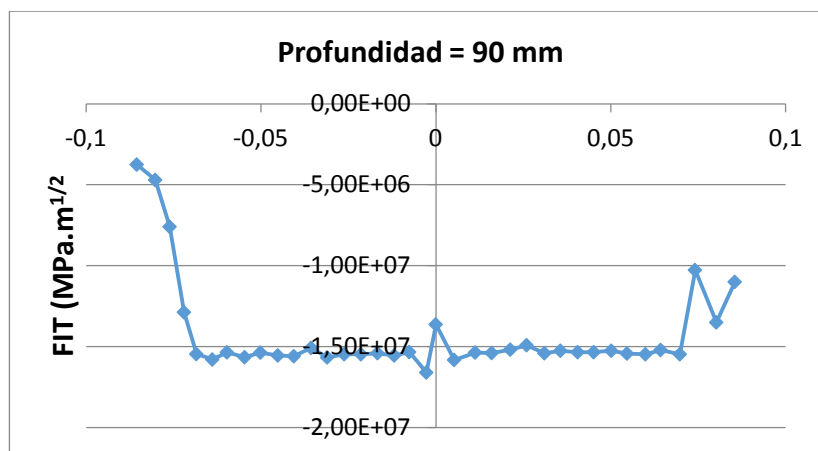
Gráfica 69. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 180 grados



Gráfica 70. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 180 grados



Gráfica 71. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 180 grados



Gráfica 72. Valores del FIT VS la coordenada del frente de la grieta en la posición de 180 grados



## CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas son:

- Inexistencia de marco legal actual
- Necesidad de la creación de una metodología para el cálculo del FIT
- Interpretación nula de los valores negativos del FIT
- Un aumento en la profundidad de la grieta incrementa los valores del FIT
- Un aumento en la profundidad de la grieta incrementa los valores de la tensión de Von Mises

Cabe reseñar, para un mejor entendimiento de las conclusiones obtenidas en este trabajo, que hasta el día de hoy y como consecuencia de las investigaciones llevadas a cabo, **no existen estudios precedentes** que hayan profundizado en la materia tratada. Por tanto, podríamos considerar este estudio como pionero en dicho campo, abriendo el mismo expectativas futuras, que entre otras cosas, sirvan para el nacimiento de un marco regulador legal que proporcionen un amparo a las normas técnicas aplicables al ámbito ferroviario. Como consecuencia de todo ello, en este trabajo, como se acaba de poner de manifiesto **no** se puede hacer **referencia** a un **amparamiento normativo legal** en la materia.

También es importante resaltar que ha sido necesaria la **creación** de una **metodología para el cálculo del FIT** que permite la obtención del mismo en cualquier tipo de eje y en las condiciones que se precisen, siendo posible la modificación de manera rápida y sencilla de cualquier parámetro que sufra una alteración con respecto a los utilizados en este estudio. Como por ejemplo, la carga del tren, la geometría del eje, el material utilizado, etc.

Es destacable que los valores del **FIT** obtenidos con el programa **ABAQUS** expresados en **valores negativos** producidos cuando la grieta está cerrada, es decir, cuando las superficies de fractura se encuentran en contacto, como consecuencia del efecto del giro del eje. Dicha circunstancia se produce entre las posiciones angulares de 90 y 270 grados. Tales valores negativos deben ser **interpretados como nulos**, es decir, expresan que la grieta aunque existe, se encuentra en esos instantes cerrada.

De los cálculos numéricos obtenidos se desprende con claridad que a medida que se produce un **aumento en la profundidad de la grieta**, en cada una de las diferentes posiciones del eje en las que se ha realizado el estudio, los valores del Factor de Intensidad de Tensiones (**FIT**) **del eje ferroviario incrementan** su valor. Este aumento puede ser comprobado comparando las nueve gráficas que existen por cada posición angular. Dichas gráficas se encuentran entre las páginas 86 y 107 de esta memoria, ambas inclusive.



Así mismo, se puede observar otro **incremento de las tensiones de Von Mises** que soporta el eje ferroviario cuando se **aumenta la profundidad de la grieta**, tal incremento se puede observar en la figura 58 de la página 83; así como entre las gráficas 3 y 9, ambas inclusive, ubicadas en las páginas 84, 85 y 86.

## FUTUROS TRABAJOS

En este proyecto se ha tratado de explicar minuciosamente los pasos seguidos para crear un modelo realista en el programa *ABAQUS*, que represente a un eje ferroviario en condiciones normales de trabajo.

Este modelo pretende servir de base para poder realizar con mayor facilidad los estudios futuros necesarios, para entre otras cosas posibilitar la creación de un marco técnico legal que desarrolle y ampare la circulación de los trenes en las condiciones más reales posibles. Cabría destacar que los próximos trabajos de investigación deben de ir encaminados principalmente a la realización de estudios que persigan obtener datos determinantes sobre el efecto de la fatiga de los ejes ferroviarios.

A continuación podrían plantearse estudios como:

- Estudio del comportamiento del eje en aplicación de diferentes tipos de cargas, a fin de simular las condiciones de funcionamiento de un eje lo más cercano posible a la realidad.
- Estudio del comportamiento del eje a fatiga con la idea de determinar los ciclos que puede resistir un eje manteniendo las condiciones exigibles de seguridad.
- Estudio de las posibles diferentes posiciones de rotación del eje y la influencia de la profundidad de la grieta en los valores del FIT. En este proyecto se han realizado cálculos en las posiciones angulares de 0, 30, 60, 90, 120, 150 y 180 grados. El estudio se podría ampliar a posiciones intermedias a las ya aludidas.







## **PRESUPUESTO GENERAL**

En este proyecto se ha utilizado material y herramientas, que a pesar de estar disponibles en la Universidad, llevan consigo unos gastos de uso y de mantenimiento.

A continuación se detallan las fases del proyecto, con sus duraciones aproximadas:

- 1) Definición de los objetivos del Trabajo Fin de Grado: 2 semanas
- 2) Búsqueda de información: 4 semanas
- 3) Modelización y simulación del problema: 8 semanas
- 4) Obtención de datos: 4 semanas
- 5) Análisis de los resultados: 4 semanas
- 6) Redacción de la memoria: 4 semanas

Desglose de costes que han intervenido en el proyecto:

1. Personal: Incluye la actividad en el trabajo como Ingenieros Senior, los tutores del proyecto, Juan Carlos García Prada y Zoser Kalengayi Tshilumbu; y como Ingeniero, el autor del trabajo, Juan Carlos Vázquez Olmo.
2. Tecnología: en este apartado se incluyen las licencias de los software *ABAQUS* y Office 2007.

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID****Escuela Politécnica Superior****PRESUPUESTO DEL PROYECTO****1.- Autor:**

Juan Carlos Vázquez Olmo

**2.- Departamento:**

Ingeniería Mecánica y Organización Industrial

**3.- Descripción del proyecto:**

Título: Eje ferroviario "WHEELSET": Metodología para el cálculo del Factor de Intensidad de Tensiones usando ABAQUS II

Duración (meses): 6,5

**4.- Presupuesto Total del Proyecto (€):**

19.482,16

**5.- Desglose presupuestario (costes directos):**

## 1. Costes de personal

Apellidos y Nombre	Categoría	Dedicación (hombres al mes)	Coste hombre mes	Coste (€)
García Prada, Juan Carlos	Ingeniero Senior	0,5	4289,54	2.144,77
Vázquez Olmo, Juan Carlos	Ingeniero	6	2694,39	16.166,34

**Total: 18.311,11€**

Figura 59. Tabla de costes de personal

## 2. Costes de amortización de la tecnología

Descripción	Coste (€)	% Uso dedicado al proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable2
Licencia Abaqus	21950	80	4	60	1170,66
Licencia Office 2007	119	20	1	60	0,39

**Total: 1.171,05€**

Figura 60. Tabla de costes de amortización



<sup>2</sup> Fórmula de cálculo de la Amortización:

$A/B \times C \times D$       A = nº de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado  
B = periodo de depreciación (60 meses)  
C = coste del equipo (sin IVA)  
D = %del uso que se dedica al proyecto (habitualmente 100%)

<sup>3</sup> Este capítulo de gastos incluye todos los gastos no contemplados en los conceptos anteriores, por ejemplo: viajes, dietas, etc.

### 3. Resumen de costes

Presupuesto Costes Totales	
<b>Personal</b>	<b>18.311,11</b>
<b>Amortización</b>	<b>1.171,05</b>
<b>Total: 19.482,16€</b>	

Figura 61. Tabla de resumen de costes

El presupuesto total de este proyecto asciende a la cantidad de 19.482,16€.

Leganés, 27 de Septiembre de 2015

Fdo. Juan Carlos Vázquez Olmo





---

## BIBLIOGRAFÍA

1. A. RAMÍREZ, J. LÓPEZ, A. MANZANILLO Y D. PORTILLO. “Deformación y resistencia de los materiales”. Instituto Politécnico Universitario Santiago Mariño. Maracaibo, 2013. [www.monografias.com](http://www.monografias.com)
2. AUTOFEM ANALYSIS. “La deflexión de una viga bajo una carga uniformemente distribuida”. [www.autofemsoft.com](http://www.autofemsoft.com)
3. D. SÁNCHEZ-CAPITÁN CUADRADO. “Análisis de tensiones en piezas mecánicas de geometría cilíndrica utilizando el método de los elementos finitos”. 2011.
4. EADIC: FORMACIÓN Y CONSULTORÍA. “Teoría del Método de los Elementos Finitos (M.E.F.) y el Preproceso”. 2012. [eadic.com](http://eadic.com)
5. E. GINER, N. SUKUMAR, J. E. TARANCÓN Y F. J. FUENMAYOR. “An Abaqus implementation of the extended finite element method”.
6. E. MIGUEL MARCO. “Análisis modal de un eje ferroviario y comparativa con un equivalente unidimensional”. Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 2012.
7. H. MERA PANADERO. “Metodología para el análisis de esfuerzos y la fatiga de ejes y obtención del factor de intensidad de tensiones mediante el método XFEM en ABAQUS”. Proyecto fin de Carrera. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid. 2014.
8. J. I. LOPEZ GONZALEZ. “Multianálisis de un eje ferroviario mediante el software Pro-Engineer”. Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 2011.
9. M. A. PERALTA MENDIETA, V. B. MANZUR VEGA Y S. KIRCHHOFFER EPPRECHT. “Introducción a la Mecánica de Fractura y Fractografía”. Proyecto fin de carrera. Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ingeniería. Cátedra de Mecánica de Materiales I. Fiuna, 2010. <http://es.scribd.com/doc/35673631/Mecanica-de-Fractura-y-Fractografia#scribd>



10. M. BUESA MARTÍN. "Factor de intensidad de tensiones para fisuras semielípticas en ejes cilíndricos bajo flexión rotativa". Proyecto fin de carrera. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid.
11. M. D. MOZAHID HOSSAIN. "Modeling of fatigue crack growth with Abaqus".
12. M. MIGUEL ALCAÑIZ. "Modelado y análisis por elementos finitos de un eje ferroviario hueco usando Pro-Engineer". Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 2011.
13. M. NOVELLA PASTOR. "Análisis del factor de intensidad de tensiones en un eje con una fisura de frente recto". Proyecto fin de Carrera. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid. 2012.
14. S. RAHILI KHORASAN. "Finite-Element simulations of Glulam Beams with Natural Cracks". 2012.
15. W. D. CALLISTER JR. Libro "Introducción a la ciencia y a la teoría de los materiales". Ed. REVERTÉ. Barcelona, 2007.  
[https://books.google.es/books?id=gnfPV1txXiUC&pg=PA202&lpg=PA202&dq=La+teoría+de+la+fractura+de+Griffith&source=bl&ots=Dww837KcAm&sig=fH3DIXNBCEGop3nx8IXbyyfmGOM&hl=es&sa=X&ved=0CEkQ6AEwBmoVChMIh6TLo\\_XuxwIVwbQaCh2GaAFI#v=onepage&q=La%20teoría%20de%20fractura%20de%20Griffith&f=false](https://books.google.es/books?id=gnfPV1txXiUC&pg=PA202&lpg=PA202&dq=La+teoría+de+la+fractura+de+Griffith&source=bl&ots=Dww837KcAm&sig=fH3DIXNBCEGop3nx8IXbyyfmGOM&hl=es&sa=X&ved=0CEkQ6AEwBmoVChMIh6TLo_XuxwIVwbQaCh2GaAFI#v=onepage&q=La%20teoría%20de%20fractura%20de%20Griffith&f=false)
16. WIKIPEDIA: LA ENCICLOPEDIA LIBRE. "Accidente del transbordador espacial Challenger".  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Accidente\\_del\\_transbordador\\_espacial\\_Challenger](https://es.wikipedia.org/wiki/Accidente_del_transbordador_espacial_Challenger)
17. WIKIPEDIA: LA ENCICLOPEDIA LIBRE. "Mecánica de la Fractura".  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Mecánica\\_de\\_la\\_fractura#Completamente\\_de\\_placa\\_mecánica\\_de\\_la\\_fractura](https://es.wikipedia.org/wiki/Mecánica_de_la_fractura#Completamente_de_placa_mecánica_de_la_fractura)
18. WIKIPEDIA: LA ENCICLOPEDIA LIBRE. "Teoría de placas y láminas". [es.wikipedia.org](https://es.wikipedia.org)
19. ZHEN-ZHONG DU. "Extended Finite Element Method (XFEM) in Abaqus". Dassault Systemes. [www.3ds.com/](http://www.3ds.com/)



## PLANO DEL EJE FERROVIARIO

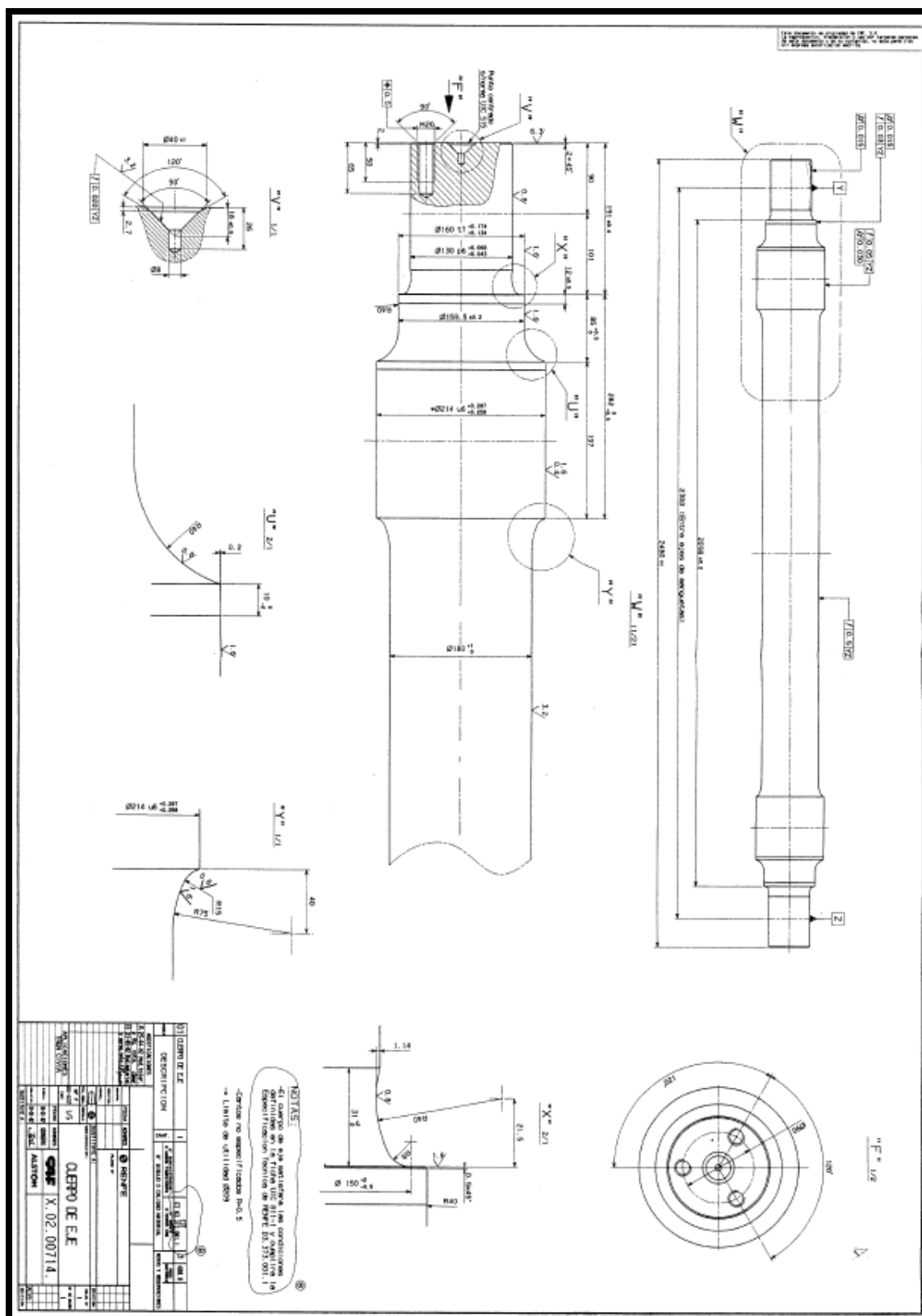


Figura 62. Plano del eje ferroviario



## 1. Ampliación del plano del eje ferroviario

### Sección "W"

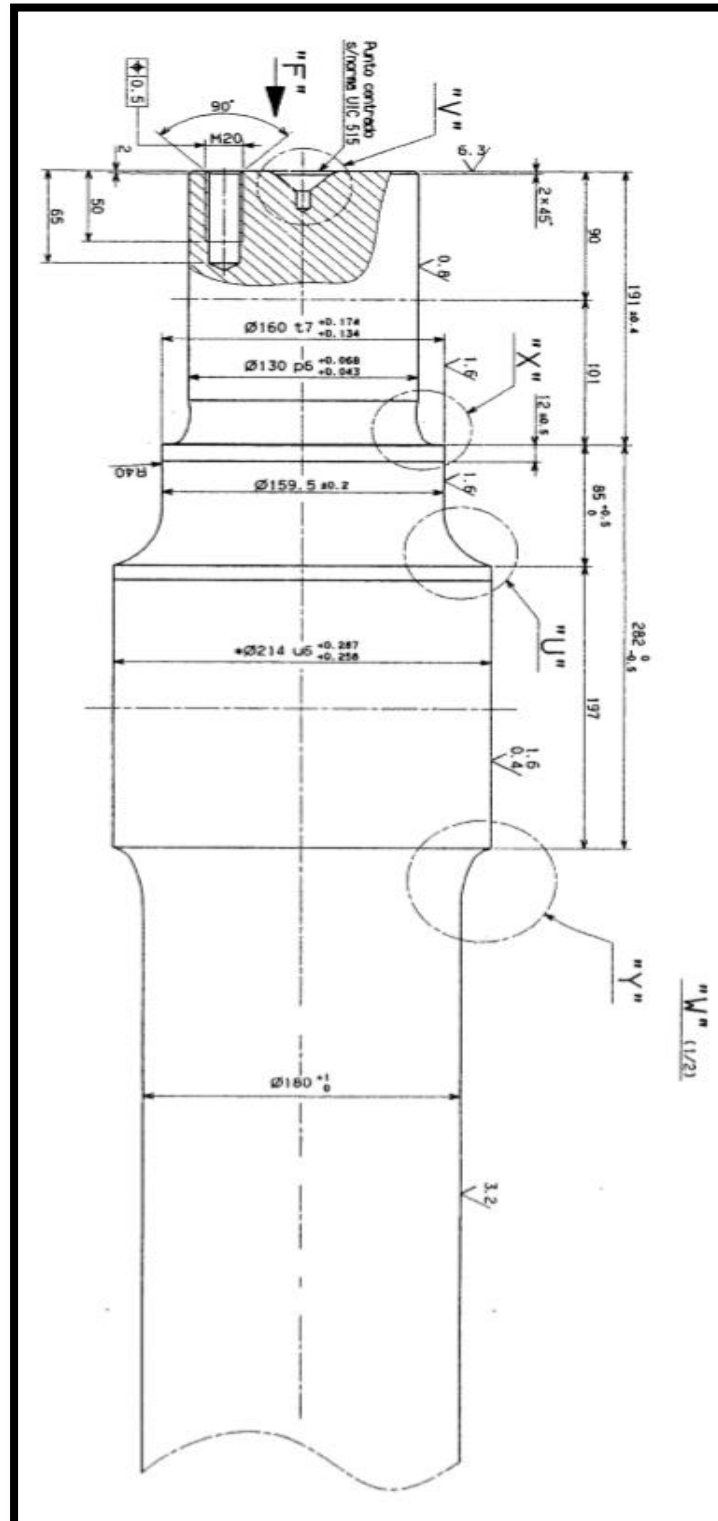


Figura 63. Sección "W" del plano del eje ferroviario

## Sección "U"

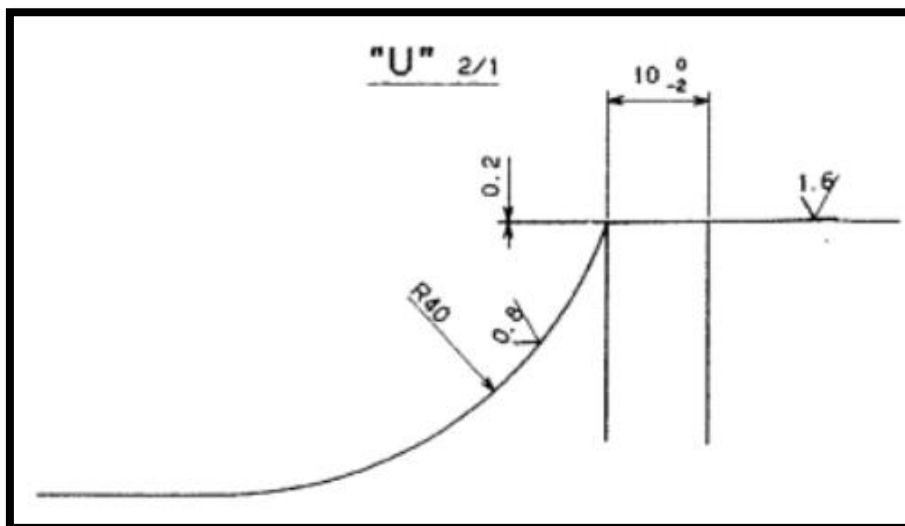


Figura 64. Sección "U" del plano del eje ferroviario

## Sección "V"

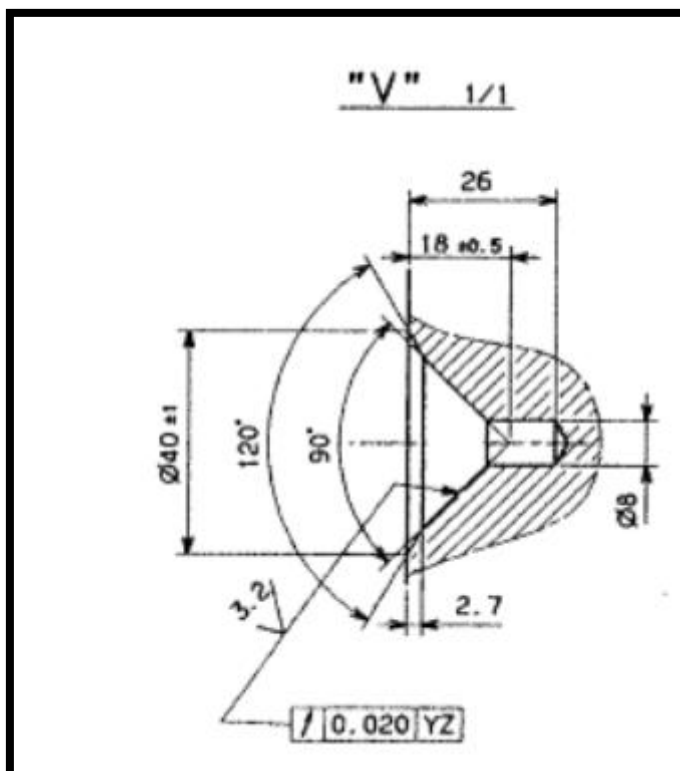


Figura 65. Sección "V" del plano del eje ferroviario

## Sección "X"

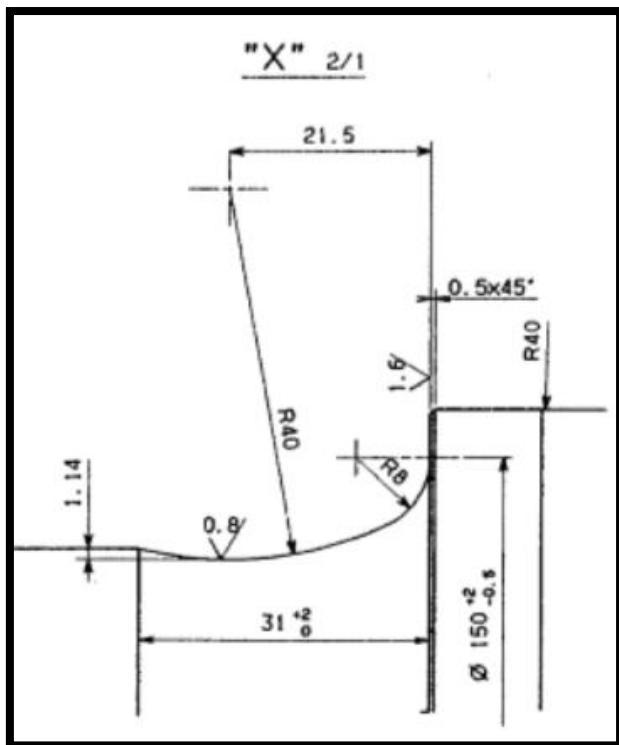


Figura 66. Sección "X" del plano del eje ferroviario

## Sección "Y"

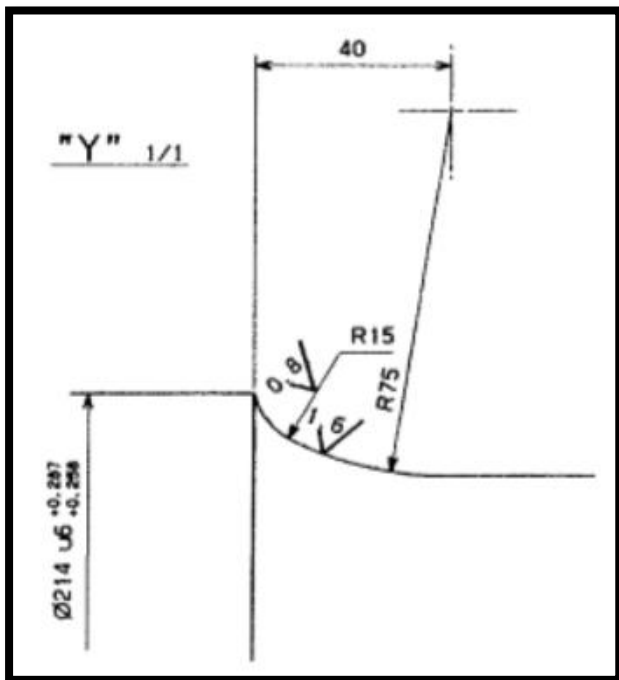


Figura 67. Sección "Y" del plano del eje ferroviario

